Ueber die Verwendbarkeit von Stromverdrängungsläufern im Einphasen-Asynchronmotor zur Erzielung günstigerer Anfahrverhältnisse.

Eine vergleichende Gegenüberstellung zum gewöhnlichen Kurzschlussläufer.

Von der
Technischen Hochschule zu Breslau
zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Walter Lampert
Bad Frankenhausen am Kyffh.

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Juli 1933.

Referent: Professor Dr.-Ing. Hilpert.

Korreferent: Professor Dr.-Ing. Euler.

1933.

Spezialdruckerei für Dissertationen Dr. Hermann Eschenhagen KG., Ohlau i. Schl.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Einleitung: Kennzeichnung der Einphasenstrommotoren und neuzeitliche Forderungen zur Weiterentwicklung. .	5
II. Versuchsaufbau und Durchführung der Versuche. . .	9
III. Die Anfahrverhältnisse.	
1. Anzugsmoment und Anfahrstrom:	
a) beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer; . . .	15
b) beim Doppelstab- und Wirbelstromläufer. . .	20
2. Die Drehmomentenbildung während des Hochlaufs:	
a) beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer; . . .	25
b) beim Doppelstab- und Wirbelstromläufer. . .	27
3. Vergleichende Gegenüberstellung der drei Läufer:	
a) in ihren Anfahrtverhältnissen;	31
b) in ihren Stromkurven.	40
IV. Vergleich:	
a) der Anfahrzeiten und Anfahrverhältnisse; .	42
b) der Anfahrzeiten und Anlauferwärmung der einzelnen Läufer.	48
V. Zusammenfassung und Gesichtspunkte zur Weiterentwicklung von Einphasen-Asynchronmotoren bis zu Leistungen von etwa 10 KW.	49

I. Einleitung:

Kennzeichnung der Einphasenmotoren und neuzeitliche Forderungen zur Weiterentwicklung.

Durch die fortschreitende Umstellung der Ortsnetze von Gleich- auf Drehstrom, der für Licht, Wärme und Haushaltgeräte in Form von Einphasenwechselstrom den Konsumenten zugeführt wird, entsteht immermehr neben den bereits heute hochentwickelten Drehstrommotoren eine starke Nachfrage nach Einphasenmotoren.

Während für den eigentlichen reinen Kraftbetrieb der Drehstrommotor von den kleinsten bis zu den größten Leistungen sich erfolgreich durchgesetzt hat, ergeben sich doch bei seiner ausschließlichen Verwendung auf einer ganzen Reihe von Anwendungsgebieten gewisse Schwierigkeiten, die in erster Linie auf der Einführung einer besonderen Drehstrom-Kraftleitung neben der Einphasen-Lichtleitung beruhen und deshalb bei nur kleinem Kraftbedarf im Haushalt unwirtschaftlich in der Anlage und unzweckmäßig im Betrieb erscheinen. So stark deshalb auf den verschiedensten Gebieten im Haushalt und Gewerbe, Büro und Geschäft, in der Landwirtschaft, in der Reklametechnik und Elektromedizin das Bedürfnis nach einem leistungsfähigen, betriebssicheren und billigen Antriebsmotor zum direkten Anschluß an die Lichtleitung ist, so stehen demgegenüber eingeengt durch die enggezogenen Grenzen der Anschlußbedingungen des VDE sowie durch die Sonderbestimmungen der örtlichen Elektrizitätswerke nur Einphasenmotoren mit geringen Anfahrmomenten oder anderen Mängeln in ihrer Betriebsweise gegenüber.

Wie bereits Tesla angegeben hat, ist die Möglichkeit auch mit Einphasenstrom einen Asynchronmotor zu betreiben schon frühzeitig erkannt worden und bisher nur mit Rücksicht auf seine schlechten Anlaufverhältnisse nicht weiter technisch in größeren Ausmaßen ausgenützt worden.

Wenn deshalb noch heute schon bei kleinen Leistungen (von etwa 1 KW an) für den Asynchron-Einphasenmotor mit Rücksicht auf die Erreichung eines größeren Anzugsmomentes

ohne Ueberschreitung des zulässigen Anfahrstromes der Schleifringläufer verwendet wird, so ist darin mit ein Grund für die geringe Verwendung dieser Motorentype zu suchen Der für den Anlaßvorgang erforderliche von Hand oder mechanisch betätigte Anlaßapparat wird immer eine Gefahrenquelle für einen einwandfreien und sicheren Betrieb bei wesentlich höheren Anschaffungskosten bilden. Da bereits seit mehreren Jahren für die Drehstrom- wie für die Einphasenmotoren die Kontaktzahl der Anlasser mit Rücksicht auf gedrängte Bauweise und Platzersparnis erheblich herabgesetzt wurde und auch in den seltensten Fällen die vorgeschriebene Anlaßzeit selbst bei mechanisch gesteuerten Anlaßgeräten infolge der wechselnden Gegendrehmomente bei verschiedenen Lastanläufen eingehalten wird, so ergibt sich von selbst, daß in diesem Falle auch der sorgfältigst eingestellte Anlaßapparat nicht vor wesentlich größeren Anlaufströmen mit ihren Rückwirkungen auf das Netz schützen kann. Zieht man noch außerdem die wesentlich größeren Kosten für den Aufbau des Schleifringläufers sowie die größeren Störungsquellen durch die Verwendung einer Drahtentwicklung, der Schleifringe und Bürsten mit ihrer Gefahrenbildung durch Funkenbildung in Betracht, dann ergibt sich zwangsläufig für eine neuzeitliche Weiterentwicklung auch im Einphasenbetrieb bei größeren Leistungen die vorzugsweise Verwendung von Kurzschlußläufern, die bereits schon seit längeren Jahren sich im Drehstrommotorenbau in hervorragendem Maße durchgesetzt haben.

Unter diesen Gesichtspunkten ergeben sich als Voraussetzung für die Verwendung von Motoren mit Kurzschlußläufer, die mit möglichst großem Drehmoment anlaufen sollen, für den Einphasenbetrieb zwei Bedingungen:

1. Die Zulassung einer Erhöhung der Anlaufstromstärken seitens der Elektrizitätswerke in öffentlichen Netzen oder

2. die Verwendung neuzeitlicher Läuferformen anstelle des bisher verwendeten gewöhnlichen Kurzschlußläufers mit seinen hohen Anlaufströmen und relativ niedrigen Anzugsmomenten.

Während die erstgenannte Möglichkeit in Deutschland auf Grund der bestehenden Vorschriften z. Zt. nicht gangbar ist und lediglich der Anschluß von Kurzschlußläufern bei direkter Einschaltung bis zu Leistungen von einem KW ge-

stattet ist, ergeben sich für einige andere Länder weit günstigere Vorschriften, die eine weitgehende Verwendung des billigen und betriebssicheren Kurzschlußläufers auch im Einphasenbetrieb möglich machen.

So ergeben sich z. B. in Frankreich nach den Vorschriften der „Union des Syndicats de l' Electricité" für Wechselstrommotoren in den gebräuchlichsten Leistungen von 0,75 bis 1,5 KW max. zulässige Anlaufströme bis zum fünffachen des Normalstromes, womit der Verwendung von Kurzschlußläufermotoren weitgehendst Raum gegeben ist.

In Ländern dagegen, die zur Zeit noch durch Vorschriften stark in der Höhe der Anlaufströme begrenzt sind wie Deutschland, Belgien, England und andere, muß von der zweiten Möglichkeit Gebrauch gemacht werden, d. h. von Motorenausführungen, die in ihrer prinzipiellen Wirkungsweise oder unter Verwendung anderer Aufbauelemente zur Erreichung ausreichender Anlaufmomente ebenfalls den geforderten Anschlußbedingungen genügen.

Es soll dabei aber grundsätzlich auch an dieser Stelle betont werden, was schon wiederholt von den verschiedensten Seiten gefordert wurde, daß es mit Rücksicht auf eine ausgedehntere Verwendung elektrischer Antriebsmotoren insbesondere zur Verwendung in den oben erwähnten Anwendungsgebieten einer grundsätzlichen Revision der Vorschriften über die Zulassung von Kurzschlußläufern in öffentlichen Netzen im Interesse von Verbraucher, Fabrikationsfirma und Energieerzeuger dringend bedarf.

Unter dem Zwange begrenzter Anlaufströme bei gleichzeitiger ausreichender Anfahrmomentbildung ist ein selbständiger Anlauf der Einphasenasynchronmotoren entweder durch ihre Bauweise als Repulsions-Induktions-Motor oder unter Verwendung einer Hilfswicklung neben der reinen Arbeitswicklung zu erzielen.

Abgesehen vom reinen Einphasenrepulsionsmotor mit Hauptstromcharakteristik und starker Drehzahlschwankung bei wechselnder Belastung kann erstgenannte Ausführungsform zur Verbesserung der Anlaufverhältnisse Verwendung finden. Der Motor läuft in diesem Falle (nur für kleinere Motorenleistungen!) als reiner Repulsionsmotor mit etwa dreifachem Nenndrehmoment an. Sein Anker wird nach Erreichung der Nenndrehzahl am Kollektor durch einen Flieh-

kraftschalter kurz-geschlossen, sodaß der weitere Betrieb als reiner Asynchrom-Induktions-Motor möglich ist. Auch bei wechselnder Belastung wird dann seine Drehzahl annähernd beibehalten, während bei starker Ueberlastung und starker Drehzahlabnahme durch Oeffnen des Fliehkraftschalters die Möglichkeit weitgehendster Ueberlastbarkeit durch die wiedergewonnene Hauptstromcharakteristik gegeben ist.

Im anderem Falle kann aber auch ein Anlauf als reiner Asynchronmotor unter Verwendung oben erwähnter Hilfsphasenwicklung erzwungen werden. Die für die Anlaufmomentenbildung erforderliche Phasenverschiebung des Hilfsphasenstromes erhält man zweckmäßig durch das Vor- bzw. Parallelschalten von Drosselspulen oder Kondensatoren im Hilfsphasenkreis, die nach erfolgtem Anlauf meistens abgeschaltet werden.

Während man zweckmäßig mit Rücksicht auf Preisgestaltung, Einschaltstrom und Regelbarkeit des Anzugsmomentes Induktivitäten in Form von Drosselspulen zur Einschaltung in den Hilfsphasenkreis wählen wird, sei noch auf die Kondensator-Motoren der AEG. und SSW. mit Leistungen bis zu einem KW besonders hingewiesen.

Wie noch später näher gezeigt wird, wird hier zur Erzeugung des Anlaufmomentes die erforderliche Phasenverschiebung durch einen Kondensator bewirkt, der mit der Hilfsphase in Reihe geschaltet ist. Infolge eines fast gleichmäßigen Anteils der Haupt- und Hilfswicklung an der Drehmomentenbildung ergibt sich längs des ganzen Läuferumfangs ein fast konstantes, kräftig wirkendes Drehmoment, das sich besonders im Anzug im etwa dreifachem des Nenndrehmomentes bei etwa 2,2 fachem Anlaufstrom äußert. Zur Kleinhaltung des Kondensators erfolgt sein Anschluß über einen Transformator, dessen Primärwicklung für Anlauf und Lauf Anzapfungen aufzuweisen hat, deren jeweilige Umschaltung bei Erreichung bestimmter Drehzahlen durch einen auf der Motorwelle direkt angeordneten Zentrifugalschalter selbständig erfolgt. Durch seinen hohen Leistungsfaktor ($\cos\varphi = 0{,}85$ bei Vollast) und gutem Wirkungsgrad ergibt sich bei allerdings etwas höherem Preis eine auch unter schwierigen Anlaufsbedingungen betriebssicher arbeitende Kleinmotorenausführung, die außerdem noch durch die infolge Fortfalls des Kollektors bedingte Rundfunkstörungsfreiheit angenehm auffällt.

Für Motoren größerer Leistung (etwa bis 10 KW) dürfte dagegen anstelle des Kondensators mit Transformatorenanschluß die Erzeugung einer induktiven Phasenverschiebung mittels Drosselspule zu bevorzugen sein, da mit Rücksicht auf die nur beim Anlaßvorgang verwendete Einschaltung der Hilfsphase einmal Kondensator mit Transformatorenanschluß und der dazu benötigte Zentrifugalschalter zur Umschaltung wesentlich teuerer als die Drosselspule werden und zum anderen auch für die Unterbringung des außerhalb desMotors angeordneten Kondensators größererPlatzbedarf erforderlich ist.

Unter Berücksichtigung neuzeitlicher Kurzschlußläuferformen wird im folgenden zu zeigen sein, wie die Anlaufverhältnisse sich bei ihrer Verwendung im Einphasenbetrieb verhalten und wie besonders eine Steigerung des Drehmomentes unter gleichen Anfahrstromverhältnissen zu erreichen ist.

II. Versuchsaufbau und Durchführung der Versuche.

Zur Durchführung der Versuche werden in einen normalen Drehstromstator eines Drehstrommotors von 8 KW Leistung 380 Volt nacheinander die drei zu vergleichenden Läufertypen in der Ausführungsform

a) eines gewöhnlichen Kurzschlußläufers,
b) eines Doppelstabläufers und
c) eines Wirbelstromläufers

eingebaut. Um die Maschine einphasig betreiben zu können, wurden zwei Statorwicklungsphasen unter Beachtung ihres Wicklungssinnes in Reihe geschaltet und unter Zwischenschaltung der erforderlichen Meßinstrumente an eine während der ganzen Versuche konstant gehaltene Spannung von 380 Volt bei 50 Hertz angeschlossen. Die dritte Phasenwicklung lag in Reihe mit einer Regulierdrossel zu beiden anderen Wicklungen parallel an Spannung. Siehe Schaltbild auf Seite 12.

Naturgemäß kann die bei Drehstrombetrieb normale Motorenleistung von 8 KW bei 380 Volt bei einphasigem Betrieb des Motors nicht erreicht werden, sodaß nur etwa, sofern überhaupt bei der nur auf einen Vergleich der Anlaufverhältnisse zugeschnittenen Versuchsarbeit von einer Normalleistung gesprochen werden kann, 5 KW bei herabgesetzter Sättigung als grober Vergleichsmaßstab heranzuziehen wären.

Zur Schaffung einer Vergleichsbasis für die Anlaufsverhältnisse der drei Läufertypen wurde der Luftspalt in jedem

Falle konstant auf 0,4 mm gehalten. Ebenso wurden die Läufer so bemessen, daß durch entsprechende Dimensionierung der Verluste, Streuungsverhältnisse, Nutenzahlen und Sättigungen der Wirkungsgrad und Leistungsfaktor etwa gleiche maximale Werte annahmen, da im anderen Falle die Anlaufverhältnisse wesentlich auf Kosten von Wirkungsgrad und Leistungsfaktor verbessert werden können. Vergl. Abb. 1.

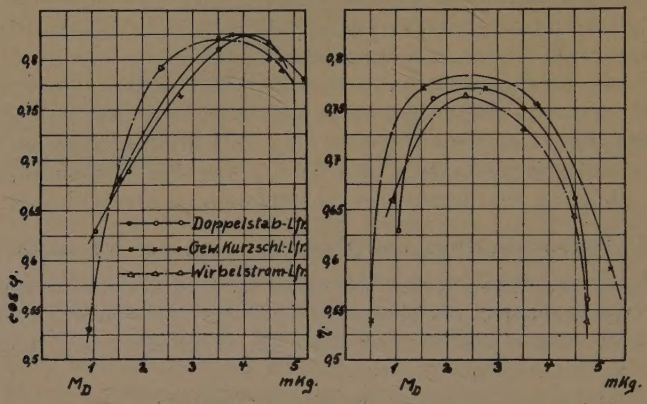


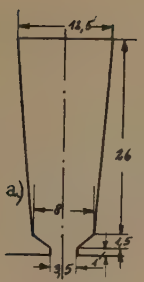
Abb. 1:
Wirkungsgrade und Leistungsfaktoren der drei Läufer (aus Tabelle 11, 17 und 23).

Die wichtigsten Abmessungen und Daten der Versuchsmaschine sind auf Seite 11 und 12 angeführt.

Wie die Maschinenabmessungen und die Abbildungen der einzelnen Läuferausführungen im folgenden zeigen, sind die Nuten des gewöhnlichen Kurzschlußläufers und des Doppelstabläufers geschrägt, um, wie noch weiter unten zu zeigen sein wird, die Anlaufverhältnisse günstiger zu gestalten. Eine Schrägung der Rotornuten im Wirbelstromläufer wurde dagegen nicht vorgenommen, da bei der an und für sich schmalen Nut von 1,8 mm Breite die durch eine Schrägung bedingte treppenförmige Schichtung der Läuferbleche eine ungünstige Raumausnützung zur Folge gehabt hätte. Im übrigen sei noch bemerkt, daß der verwendete Stator mit dem auf Seite 12 erwähnten, für die Versuchsausführung nicht benützten Schleifringläufer die eigentliche Maschineneinheit bildet, in die nur zu Versuchszwecken die drei anderen Läufer eingebaut wurden.

Die Maschinen-Abmessungen.

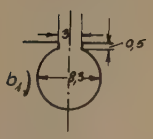
a) Stator:



Durchmesser (außen)	290	mm
Durchmesser (innen)	165	„
Länge einschl. Papier	120	„
Nutenzahl	36	
Polzahl	4	
Nutenzahl je Spulenseite	3	
Leiter pro Nut	2×24	
Leiterabmessungen blank	∅ 1,5	mm
„ isoliert	∅ 1,74	„
Widerstand pro Phase (kalt)	1,35	Ohm

Schaltung der Phasen:
2 Spulen in Reihe
2 Reihen parallel.

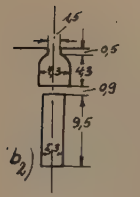
b) Rotor:



1. Kurzschlußläufer:

Einseitiger Luftabstand	0,4	mm
Durchmesser (außen)	164,2	„
Durchmesser (innen)	50	„
Länge einschl. Papier	120	„
Nutenzahl	28	
Leiter pro Nut	1	
Leiterabmessungen (blank)	∅ 8	mm
Kupferringquerschnitt	8×15	mm²

Läufernuten 20 mm geschrägt.



2. Doppelstabläufer:

Einseitiger Luftabstand	0,4	mm
Nutenzahl	58 + 58	

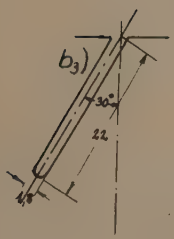
Durchmesser und Längen wie unter 1)
Außenkäfig: (Kupfer)

Stablänge	160	mm
Stabquerschnitt	4,3×4,6	mm²

Innenkäfig (Kupfer):

Stablänge	160	mm
Stabquerschnitt	3×9,4	mm²
Gemeinsamer Kupferring	280	„

Läufernuten um 14,4 mm geschrägt.

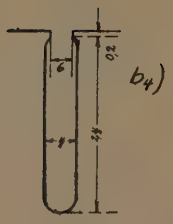


3. Wirbelstromläufer

Einseitiger Luftabstand	0,4	mm

Durchmesser und Längen wie unter 1)

Nutenzahl	44	
Leiter pro Nut	1	
Leiterabmessungen (blank)	1,5×22	mm²
Stablänge	150	mm
Kupferringquerschnitt	8×32	mm²



4. Schleifringläufer:
(für die vorliegende Versucharbeit nicht benützt).

Einseitiger Luftabstand	0,5 mm
Durchmesser (außen)	164,0 „
Durchmesser (innen)	40 „
Länge einschl. Papier	120 „
Nutenzahl	48
Nutenzahl je Spulenseite . . .	4
Leiter pro Nut	7
Leiterabmessungen (blank) . .	∅ 2,6 mm
Widerstand pro Phase	0,3 Ohm

2 Spulen in Reihe geschaltet.

Maßstab: 1 : 1.

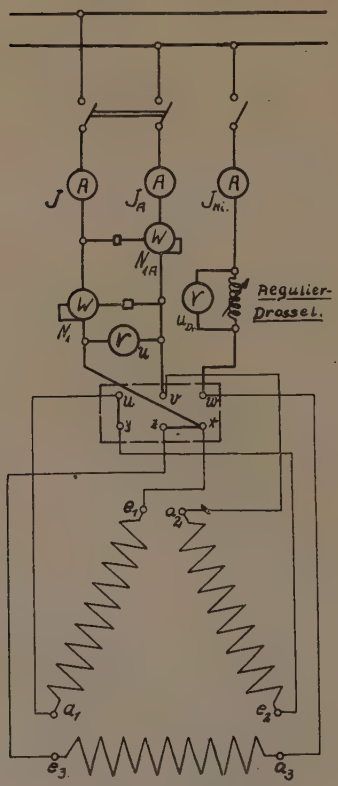


Abb. 2: Schaltung.

Zur Ausführung der Anzugsmessungen[1]) wurde das jeweilige Anzugsmoment mittels Riemen mit zwischengeschalteter

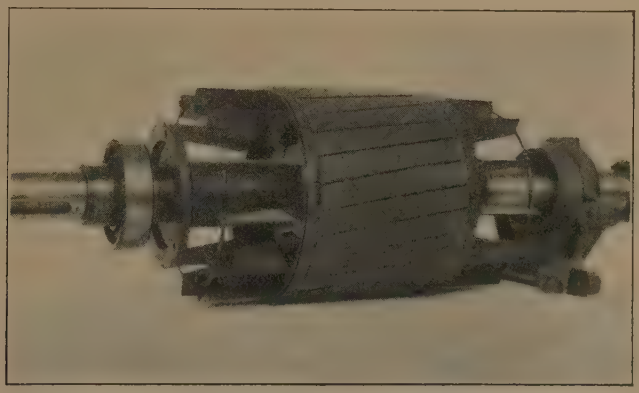


Abb. 3: Gewöhnlicher Kurzschlußläufer.

Federwage an der auf die Läuferwelle direkt aufgezogenen

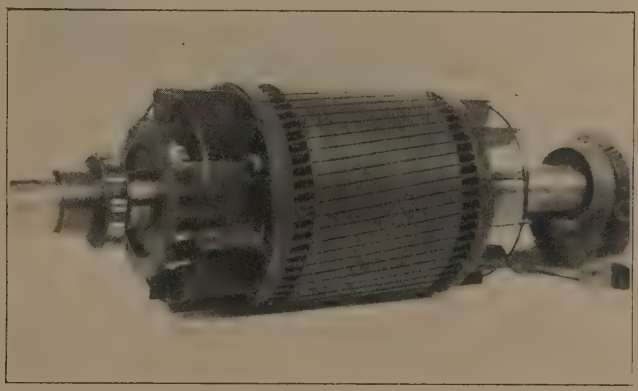


Abb. 4: Doppelstabläufer.

Bremsscheibe bei geringer Drehzahl des Läufers zwecks Aus-

[1]) Nach den in der technischen Ausdrucksform üblichen Bezeichnung wird mit Anzugsmoment oder Anlaufmoment das bei eingeschaltetem Stator auf den stillstehenden kurzgeschlossenen Läufer ausgeübte Drehmoment und mit Hochlaufmoment das jeweilige während der Anfahrperiode bei irgend einer Drehzahl des Läufers auftretende Drehmoment bezeichnet.

schaltung des Nuteneinflusses als mittleres Moment festgestellt. Zur Erzielung vergleichbarer Versuchsresultate wurde dabei auf möglichst gleichmäßige, betriebswarme Temperatur der Maschine während der Versuche Wert gelegt, da eine stark wechselnde Erwärmung besonders bei Kurzschlußläufern einen starken Einfluß auf die Anlaufverhältnisse der Maschine ausübt und zu großer Streuung der Meßpunkte Anlaß gibt.

Zur Aufnahme der Drehmomentenkurven im Hochlauf und der Belastungscharakteristiken bei verschiedenen während des Versuchs konstant gehaltenen Hilfsphasen-Induktivitäten wurde die Versuchsmaschine mit einer Pendeldyna-

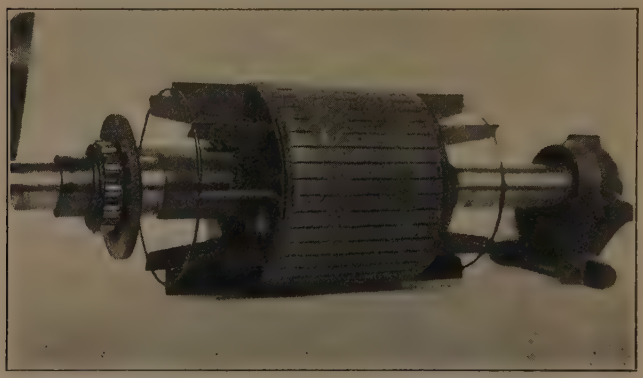


Abb. 5: Wirbelstromläufer.

mo direkt gekuppelt. Zur Festlegung der während des Hochlaufs im unstabilen Teil bei großen Schlüpfungen entwickelten Drehmomente wurde die Versuchsmaschine durch die auf das Gleichstromnetz geschaltete und fremd erregte Pendeldynamo belastet. Dadurch wurde auch im Bereich hoher Schlüpfungen eine einwandfreie stabile Drehmomentenmessung ermöglicht. Die Aufnahmen erfolgten ebenfalls in betriebswarmen Zustand der Maschine.

Für die Ermittlung der Anlaufzeiten bei verschiedenen Belastungen wurden die jeweiligen Lastmomente mittels Riemen und Gewichte auf die direkt auf die Motorwelle aufgezogene Bremsscheibe ausgeübt. Da nach Ueberwindung des

Reibungswiderstandes der Ruhe infolge der mit der Drehzahl sich ändernden Reibungsverhältnisse im Lauf auch eine Aenderung der Belastungsverhältnisse eintritt, sind in den Tabellen 7, 13 und 19 und den entsprechenden Versuchskurven zur Ermittlung der Anlaufzeiten die mittleren Anlaufmomente zugrunde gelegt.

Die für die zu errechnenden Werte benützten Formeln werden in den einzelnen Tabellen unmittelbar aufgeführt. Die Bestimmung der Hilfsphaseninduktivität erfolgte mit Rücksicht auf den nur geringen Ohmschen Widerstand und die geringen, nur 52,5 Watt betragenden Eisenverluste der Regulierdrossel auf Grund der Beziehung

$$U_{dr} = J_{hi} \cdot \omega \cdot L \text{ Volt}$$

nach Messung der jeweiligen Hilfsphasenspannung und -Stromstärke.

III. Die Anfahrverhältnisse.

1. Anzugsmoment und Anfahrstrom

a) beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer.

Von den bereits erwähnten Verfahren zum Anlassen einphasiger Induktionsmotoren hat das zur Erzeugung eines elliptischen Drehfeldes im Anlauf durch Anordnung einer Hilfswicklung neben der eigentlichen Arbeitswicklung gekennzeichnete Verfahren infolge seiner Einfachheit besondere Bedeutung erlangt. Es soll deshalb zum Vergleich der Anzugsmomente der zu untersuchenden Läufer kurz auf die Entwicklung des Anzugsmomentes bei Kurzschlußläufern allgemein eingegangen werden[2]).

Da es sich bei der verwendeten Statorwicklung, wie die Maschinenabmessungen zeigen, zwar um eine fein- aber doch ungleich verteilte Haupt- und Hilfswicklung im Stator handelt, wird gegenüber der Hilfswicklung eine etwas größere Rotorstreuung als gegenüber der Hauptwicklung festzustellen sein. Wenn auch bei den bei der Entwicklung des Anzugs-

[2]) E. Arnold: Die Wechselstromtechnik. Bd. V, 1. 1923, S. 280.

momentes stark streuenden Stromverdrängungsmotoren dieser Streuungsunterschied zwischen Haupt- und Hilfswicklung nicht so stark in Erscheinung tritt wie bei dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer, so wird trotzdem mit einer zahlenmäßigen Verkleinerung des Anzugsmomentes gegenüber gleichmäßiger Verteilung von Haupt- und Hilfswicklung zu rechnen sein.

Für die Entwicklung allgemeiner Beziehungen ist deshalb zwischen der von der Stator-Hauptwicklung im Rotor induzierten EMK E_{1r} und dem ugehörigen Rotorstrom J_{1r} der Phasenwinkel β_1 gegenüber dem Phasenverschiebungswinkel β_2 zwischen der von der Hilfswicklung im Rotor induzierten EMK E_{2r} und dem Rotorstrom J_{2r} festzustellen. Zur Vereinfachung der aufzustellenden Beziehungen seien aber die Phasenwinkel β_1 und β_2 gleichgesetzt, was sich nur, wie bereits erwähnt, zahlenmäßig in der Größenordnung des Anzugsmomentes als kleine Ungenauigkeit auswirken wird. Siehe Abb. 6.

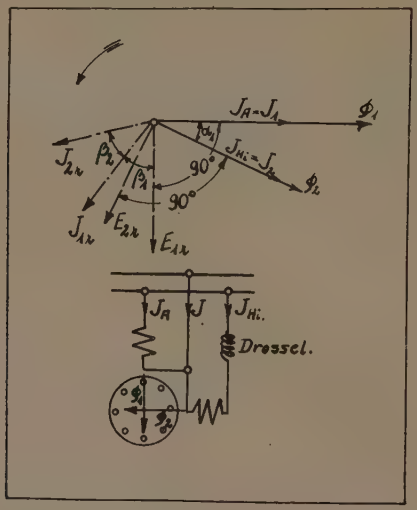


Abb. 6:
Vektordiagramm eines Einphasenmotors mit Kurzschlußläufer beim Anzug.

Zur Hervorbringung eines Drehfeldes im Anlauf wird der Hilfswicklung ein gegenüber der Arbeitswicklung zeitlich in der Phase verschobener Strom zugeführt, sodaß die von bei-

den Wicklungen erzeugten Felder ebenfalls mit entsprechender Phasenverschiebung sich zu einem resultierenden elliptischen Drehfelde zusammensetzen. Zur Erzeugung dieser Phasenverschiebung wird, wie bereits schon früher erwähnt, der Hilfsphase eine Drosselspule oder ein Kondensator vorgeschaltet, während die Hauptwicklung meistens unmittelbar oder über einen Ohmschen Widerstand in der Anlaßperiode an Spannung gelegt ist. Zur Entwicklung des Anzugsmomentes werden von den beiden Statorfeldern in den jeweiligen Achsrichtungen im Rotor EMKe und damit Rotorströme induziert, die mit den entsprechenden Statorfeldern Drehmomente bilden, welche sich ihrerseits wieder zu dem resultierenden Anzugsmoment zusammensetzen.

Unter Einsetzung der auf die Windungszahl der Statorhauptwicklung w_1 reduzierten Rotorströme J'_{1r} und J'_{2r} ergibt sich das Anzugsmoment zu

$$M_{DA} = C[\Phi_2 \cdot J'_{1r} \cdot \cos\ (J_{1r}\ \Phi_2) + \Phi_1 \cdot J'_{2r} \cdot \cos\,(J_{2r}\,\Phi_1)],$$

wenn $C = \dfrac{p \cdot w_1 \cdot f_w}{\sqrt{2}}$ gesetzt wird und f_w den Statorwicklungsfaktor zum Ausdruck bringt.

Ersetzt man die auf die Hauptwicklung reduzierten Rotorströme durch die Beziehungen

$$J_{1r}' = \frac{U_1}{\sqrt{r_2'^2 + x_2'^2}} \quad \text{und} \quad J_{2r}' = \frac{E_{2r}'}{\sqrt{r_2'^2 + x_2'^2}}$$

worin U_1 die Statorklemmenspannung und E_{2r}' die auf die Hauptwicklung reduzierte Rotor-EMK des Querfeldes bedeutet.

Werden weiterhin die Flüße Φ_1 und Φ_2 durch die Beziehungen

$$\Phi_1 = \frac{U_1 \cdot 10^8}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot w_1 \cdot f_w} \quad \text{und}$$

$$\Phi_2 = \frac{E_{2r} \cdot 10^8}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot w_1 \cdot f_w}$$

ausgedrückt, dann ergibt sich nach einigen Umformungen das Anzugsmoment zu

$$M_{DA} = 2 \cdot U_1 \cdot E_{2r}' \cdot \frac{r_2'}{r_2'^2 + x_2'^2} \cdot \sin \alpha$$

Setzt man an Stelle der Spannungen U_1 und E'_{2r} die reduzierten Rotorströme, dann wird

$$M_{DA} = 2 \cdot J_{1r}' \cdot J_{2r}' \cdot r_2' \cdot \sin \alpha$$

Wird weiterhin

$$J_{1r}' = \frac{J_1}{C_2} \text{ und } J_{2r}' = \frac{J_2 \cdot u}{C_2} \text{ gesetzt,}$$

wobei J_1 den Statorstrom in der Hauptwicklung und
J_2 den Statorstrom in der Hilfswicklung darstellen,
dann ergibt sich das Drehmoment im Anzug

$$M_{DA} = 2 \cdot J_1 \cdot J_2 \cdot u \cdot r_2' \cdot \sin \alpha \cdot 1/C_2^2$$

Der Faktor „2" wird, wie bereits einleitend erwähnt, infolge der ungleichen Verteilung von Haupt- und Hilfswicklung etwas kleinere Werte in Wirklichkeit annehmen.

Damit ergibt sich die Abhängigkeit des Anzugsmomentes von

der Größe des Rotorwiderstandes r_2,
dem Uebersetzungsverhältnis u zwischen Hilfs- und Hauptwicklung,
der Größe der Statorströme J_1 und J_2 und
dem Sinus der Phasenverschiebung zwischen beiden Strömen.

Während im allgemeinen der Statorstrom J_1 mit Rücksicht auf die Höhe des Einschaltstromes und ebenso das Uebersetzungsverhältnis u auf Grund des umgeschalteten Drehstromstators für eine Verbesserung des Anzugsmomentes nicht in Betracht zu ziehen sind, ergibt sich eine wirkungsvolle Verbesserungsmöglichkeit in den beiden anderen Faktoren $J_2 \sin \alpha$ und r_2'. Unter Berücksichtigung der Größe $J_2 \cdot \sin \alpha$ ist demnach das Anzugsmoment bei konstanten Läuferwiderstand r_2 nur von der Größe und Phasenverschiebung des Hilfsphasenstromes J_2 abhängig und wird mit wachsender Phasenverschiebung steigen, wie Abb. 7 zum Ausdruck bringt.

Unter Anlegung einer konstanten Klemmenspannung an den Stator wird der Kurzschlußstrom bei konstanter Impedanz der Hauptwicklung seiner Größe und Lage nach im Diagramm eindeutig festgelegt sein. Für die Konstruktion des Kreisdiagramms ist der Einfachheit halber der im Vergleich zum Kurzschlußstrom sehr geringe Magnetisierungsstrom vernachlässigt worden.

Schaltet man vor die Hilfswicklung eine Drosselspule mit

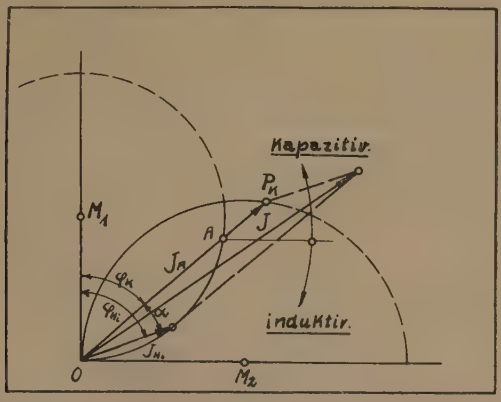


Abb. 7:

Vektordiagramm eines Einphasenmotors mit Kurzschlußläufer mit beim Anfahren vor die Hilfswicklung geschalteten Reaktanzen. Leerlaufstrom vernachlässigt.

veränderlicher Reaktanz, dann bewegt sich nach Arnold[3]) der Hilfsphasenstrom J_2 ebenfalls auf einem Kreise. Bei gleicher Reaktanz von Haupt- und Hilfswicklung und direktem Anschluß der Hilfsphasenwicklung an die Klemmenspannung fallen beide Stromvektoren zusammen, sodaß $J_2 \cdot \sin \alpha = 0$ wird und damit auch das Anzugsmoment den gleichen Wert annimmt. Mit zunehmender Reaktanz im Hilfsphasenkreise vergrößert sich der Winkel α und damit auch das Anzugsmoment. Während man aber im allgemeinen mittels Drossel über einen bestimmten Phasenwinkel nicht hinauskommt, ergibt sich eine weitgehende Verbesserung des Anzugsmomentes durch Verwendung einer negativen Reaktanz, d. h. durch Einschaltung eines Kondensators in die Hilfsphase.

Diese beim Kondensatormotor mit großem Erfolg verwendete Maßnahme kommt deutlich im vorliegenden Diagramm zum Ausdruck. Dieses bringt klar zur Kenntnis, daß nur auf kapazitiven Wege ohne Vergrößerung der Hilfsphasenstromes eine Möglichkeit zur Erreichung größerer Anzugsmomente gegeben ist.

---

[3]) E. Arnold: Die Wechselstromtechnik. Bd. V, 1. 1923, S. 284.

Andererseits ergibt sich auch noch die Möglichkeit zur Verbesserung des Anzugsmomentes durch eine Vergrößerung des Rotorwiderstandes r_2, was bei Schleifringläufen durch das Einschalten von Widerständen in den Rotorstromkreis erreicht wird. Beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer würde eine Vergrößerung des Rotorwiderstandes r_2 allerdings eine starke Zunahme der Schlüpfungen im Lauf und damit eine starke Leistungsabnahme zur Folge haben. Damit tritt eine Verschlechterung des Wirkungsgrades bei zunehmender Motorerwärmung ein.

b) **Anzugsmoment und Anfahrstrom** beim Doppelstab- und Wirbelstromläufer.

Verwendet man dagegen in der gleichen Maschine unter sonst unveränderten Verhältnissen einen Doppelstabläufer mit den eingangs für einen Vergleich erwähnten Voraussetzungen, dann ergibt sich nach den Versuchsergebnissen eine wesentliche Zunahme des Anzugsmomentes. Im Gegensatz zum gewöhnlichen Kurzschlußläufer wird hier durch das Vor-

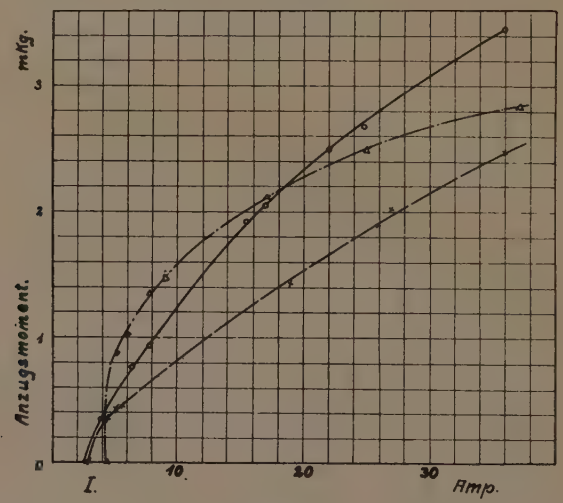


Abb. 8:
Anzugsmomente in Abhängigkeit von Hilfsphasenstrom J_{Hi} (aus Tabelle 6, 12 und 18.)

handensein zweier Käfige beim Anlauf nur der äußere (Anlaufkäfig!), mit hohem Ohmschen Widerstand ausgestattete wirksam sein. Bei Erreichung kleinerer Schlüpfungen und damit kleinerer Rotorfrequenzen tritt durch die Parallelschaltung des inneren Käfigs (Arbeitskäfig!) zum äußeren eine starke Abnahme des Rotorwiderstandes ein. Damit wird bei etwa gleichen Streuverhältnissen im Lauf wie beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer im Anzug ohne Vergrößerung des Anlaufstromes eine wesentliche Erhöhung des Anzugsmomentes eintreten, ohne daß später im Lauf eine Verschlechterung des Wirkungsgrades und wesentliche Verkleinerung der Ueberlastbarkeit eintritt. Die Vorteile, die sich durch die Verwendung des Doppelstabläufers im Einphasenbetrieb ergeben, liegen damit wie beim Drehstrommotor in einem bei gleicher Stromaufnahme größerem Anzugsmoment, sodaß auch hier bei größeren Leistungen mehr und mehr auf den Schleifringläufer verzichtet werden kann.

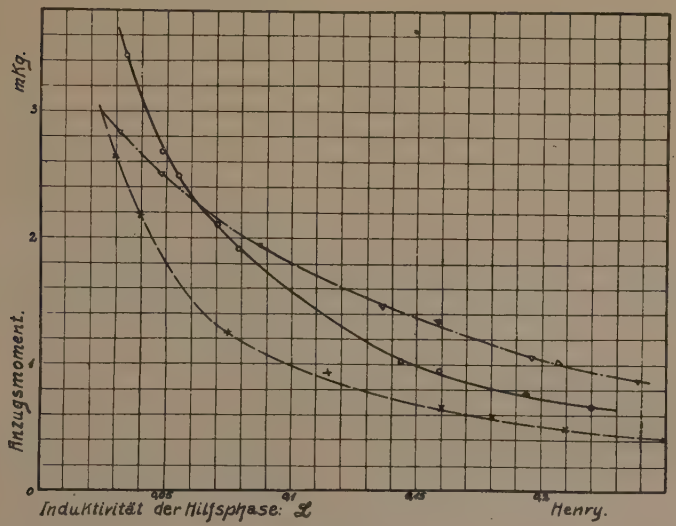


Abb. 9:
Anzugsmomente als Funktion der Hilfsphasenindutivität (aus Tabelle 6, 12 und 18.)

Nach Abb. 8 und 9 zeigt sich insbesonders bei kleineren Hilfsphasenströmen der Doppelstabläufer über den gewöhn-

lichen Kurzschlußläufer hinsichtlich des Anzugsmomentes stark überlegen, z. B. bei einem Hilfsphasenstrom von 10 Amp. um den 1,52-fachen Betrag, der allerdings mit wachsenden Hilfsphasenströmen eine geringe Abnahme erfährt. Trotzdem ist bei einem Hilfsphasenstrom von 30 Amp. der Doppelstabläufer dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer immerhin noch um den 1,43-fachen Wert überlegen.

In der Abb. 10 sind Gesamtstromaufnahme und Anzugs-

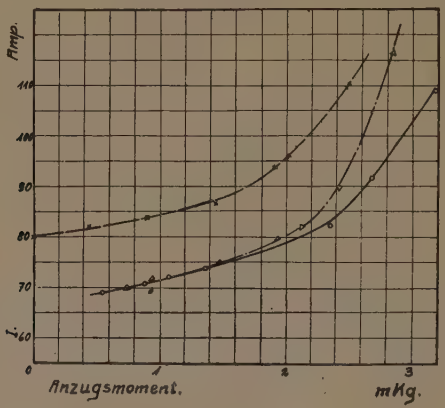


Abb. 10:

Anlaufstrom in Abhängigkeit von den Anzugsmomenten (aus Tabelle 6, 12 und 18.)

moment gegenübergestellt und ergeben bei gleichem Anzugsmoment im unteren Momentenbereich eine Verringerung des Anlaufstromes von etwa 15% gegenüber dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer, die sich bei größeren Momenten bis auf etwa 22% auswächst.

In ähnlicher Weise wie beim Doppelstabläufer lassen sich auch durch den Einbau eines Wirbelstromläufers die Anlaufverhältnisse verbessern. Seine Wirkungsweise beruht auf der bekannten Tatsache, daß in den stabförmigen Rotorleitern des Wirbelstromläufers unter der Wirkung des Streuflusses, der um die Leiter vom durchfließenden Rotorstrom erzeugt wird, Wirbelströme entstehen, die durch Zusammendrängung des Stromes auf einen Teilleiterquerschnitt den Widerstand des Rotorleiters scheinbar vergrößern. Da die Stromverdrängung und damit die Widerstandsvermehrung mit zunehmen-

der Frequenz des Rotorstromes und Höhe und Unterteilung des Leiters wächst, ergibt sich im Anlauf eine erstrebenswerte Verbesserungsmöglichkeit zur Vergrößerung des Anlaufwiderstandes und damit zur Verbesserung des Anlaufmomentes.

Wie weiterhin durch grundlegende Arbeiten von Rogowski und Rüdenberg[4]) bewiesen ist, tritt außerdem durch die Stromverdrängung in den langgestreckten schmalen Rotorleitern neben der Widerstandsvermehrung im Anlauf noch gleichzeitig eine wesentliche Verminderung der Induktivität ein. Diese Induktivitätsverminderung tritt besonders beim nichtunterteilten Leiter, wie er in erster Linie bei kleineren und mittleren Leistungen im Einphasenbetrieb mit Rücksicht auf die geringeren Nutentiefen bei kleinen Rotordurchmessern Verwendung finden wird, mit zunehmender nummerischer Nutentiefe in Erscheinung.

Wenn auch die gegenüber anderen Läuferausführungen tieferen Nuten eine Erhöhung der Rotorstreuung bedingen, so hat dies, wie Abb. 1 zeigt, keinen nennenswerten Einfluß auf Leistungsfaktor und Kippmoment. Durch die schmalen Nuten und die dadurch bedingten breiten Läuferzähne kann die Zahnsättigung und damit der Magnetisierungsstrom wesentlich kleiner als beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer gehalten werden, sodaß im Hinblick auf die Gesamtstreuung der Maschine der oben erwähnte immerhin als gut anzusprechende Leistungsfaktor der Maschine begründet liegt. Das gleiche gilt auch für den Wirkungsgrad, wo unter Ausnützung des Gesamtleiterquerschnittes bei den kleinen Lauffrequenzen größere Stromwärmeverluste gegenüber dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer nicht entstehen.

Diese soeben gemachten Ausführungen werden auch durchaus durch die Versuche als gültig erhärtet. In gleicher Weise, wie beim Doppelstabläufer ergibt sich auch beim Wirbelstromläufer eine starke Ueberlegenheit über den gewöhnlichen Kurzschlußläufer, die sich besonders, wie die Abb. 8 und 9 zeigen, bei kleinen Hilfsphasenströmen in noch stärkerem Maße als beim Doppelstabläufer äußert. Bei einem Hilfsphasenstrom von 10 Amp. wird das 1,9-fache Anzugsmoment gegenüber dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer fest-

[4]) Arch. f. El. Band II und ETZ 1918.

gestellt. Bei weiterer Zunahme des Hilfsphasenstromes tritt allerdings beim Wirbelstromläufer eine stärkere Abnahme des Anzugsmomentes als beim Doppelstabläufer ein, sodaß bei einem Hilfsphasenstrom von 30 Amp. nur noch der 1,25-fache Wert des Anzugsmomentes gegenüber dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer festzustellen ist.

Die Größe des Anlaufstromes ist auch hier festgelegt durch Widerstand und Reaktanz in Stator und Rotor. Unter

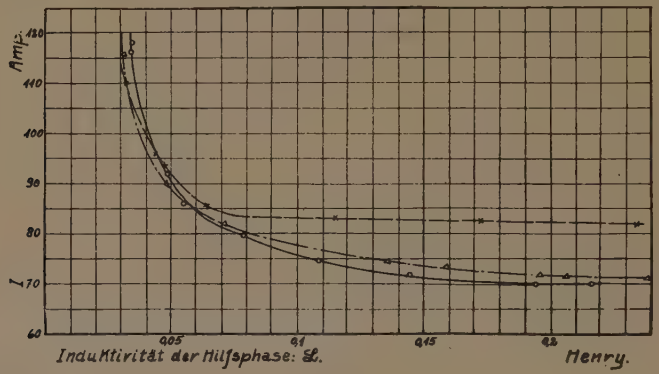


Abb. 11:

Anlaufstrom in Abhängigkeit von der Hilfsphaseninduktivität (aus Tabelle 6, 12 und 18.)

den von vornherein festgelegten Vergleichsbedingungen ergeben sich beim Wirbelstromläufer (vergleiche Abb. 10 und 11) bei einer Gesamtstromaufnahme von 80 Amp. bereits Anzugsmomente von 2 mkg, die zwar hinter denen des Doppelstabläufers um 0,1 mkg zurückbleiben. Das gleiche Anzugsmoment von 2 mkg wird beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer erst bei der um 20% höheren Stromaufnahme von 96 Amp. erreicht. Bei geforderten größeren Anzugsmomenten tritt jedoch beim Wirbelstromläufer eine starke Erhöhung des Anfahrstromes ein, die ihm gegenüber dem Doppelstabläufer zwar benachteiligt, ihm aber immerhin noch eine entscheidende Ueberlegenheit über den gewöhnlichen Kurzschlußläufer verschafft. Damit ergibt sich die Zweckmäßigkeit einer guten Verwendbarkeit des Wirbelstromläufers in erster Linie bei kleineren Anzugsmomenten, während für größere der Doppelstabläufer vorzuziehen ist.

2. Die Drehmomentenbildung während des Hochlaufs

a) beim gewöhnlichen Kurschlußläufer.

Nachdem mittels der zur Erzeugung eines Hilfsfeldes zum Anlauf eingeschalteten Hilfsphasenwicklung ein Anzugsmoment hervorgebracht worden ist, läuft der Motor unter Entwicklung entsprechender Hochlaufmomente in die durch die jeweilige Belastung vorgeschriebene Drehzahl hinein.

Während bei der Erzeugung des Anzugsmomentes bei stillstehendem Rotor eine gegenseitige Beeinflussung von Haupt- und Hilfswicklung nicht stattfindet, erfahren während des Hochlaufs durch den umlaufenden Rotor beide Wicklungen eine Beeinflussung. Bei Drehung des Rotors in den beiden Statorfeldern der Haupt- und Hilfswicklung erfolgt die Erzeugung je eines Querfeldes in zwei zu den beiden Statorfeldern um je 90° verschobenen Richtungen. Durch die Zusammensetzung aller Felder zu einem entsprechend phasenverschobenen resultierenden Felde kann die Phasenverschiebung zwischen den EMKen in den Statorwicklungen und dem Rotorstrom so verändert werden, daß schon bei einer anderen Rotorgeschwindigkeit als der synchronen die auf den Rotor übertragene Leistung kleiner wird als die Rotorkupferverluste und damit die Vollastdrehzahl bisweilen nicht mehr erreicht werden kann. Da aber die Kupferverluste im Rotor proportional dem Rotorwiderstand r_2 sind und andererseits mit Rücksicht auf ein gutes Anzugsmoment ein großer Rotorwiderstand durchaus erwünscht ist, werden zur Erreichung eines einwandfreien Hochlaufs Kompromisse hinsichtlich der günstigsten Wahl des Rotorwiderstandes beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer zu treffen sein.

Im Gegensatz zum Drehstrommotor ist beim Einphasen-Induktionsmotor das maximale Drehmoment (Kippmoment) auch von der Größe des Rotorwiderstandes abhängig, da unter dem Einfluß des inversen Drehfeldes ein das Nutzdrehmoment verkleinernder Rotorstrom induziert wird. Ebenso hat auch die Rotorreaktanz x_2 größeren Einfluß auf die Momentenbildung als beim Drehstrommotor aufzuweisen.

Nach Arnold[5]) ergibt sich demnach für das maximale

[5]) E. Arnold: Die Wechselstromtechnik. Bd. V, 1. 1923, S. 134.

Drehmoment bei Einphasen-Induktionsmotoren in synchronen Watt

$$M_{Dmax} = \frac{U_1^2}{2\,C_1\left[r_1 + \frac{r_2'}{2\,C_2} + \sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{2\,C_2}\right)^2 + (x_1 + 2\,x_2')^2}\right]}$$

Demnach wird der Verlauf der Drehmomentenkurve im Hochlauf in starkem Maße auch vom Rotorwiderstand und der Rotorreaktanz beeinflußt werden. Daß sich mit zunehmender Größenordnung des Hilfsfeldes auch eine entsprechende Vergrößerung der Drehmomente während des Hochlaufs einstellen muß, ist nach dem bereits im vorhergehenden Abschnitt gesagten ohne weiteres verständlich. Vergl. Abb. 12.

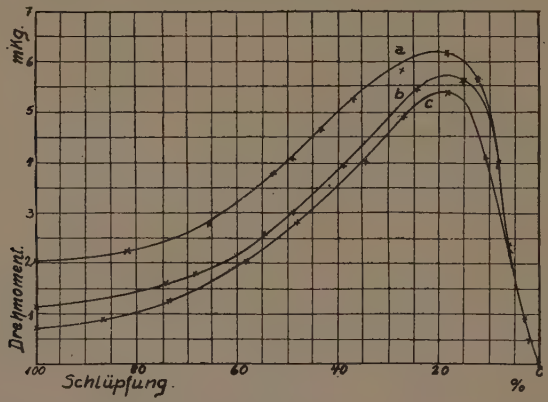


Abb. 12:

Drehmotorenkurven für den gewöhnlichen Kurzschlußläufer. Hilfsphaseninduktivität bei Kurve a: 0,033 Henry, b: 0,087 Henry, c: 0,147 Henry (aus Tabelle 14—16.)

Allerdings ist mit Rücksicht auf einen guten Wirkungsgrad bei Vollast (bedingt im hervorragenden Maße durch geringe Kupferverluste) der Verlauf der Hochlaufkurven beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer etwas ungünstiger als beim Doppelstabläufer, da das Kippmoment des gewöhnlichen Kurzschlußläufers wesentlich höher als beim Doppelstabläufer liegt. Dieser große Momentüberschuß aber bewirkt während des Hochlaufs eine größere Beschleunigung der hochzufahrenden Last, die für manche Antriebe infolge stärkerer Bean-

spruchung der Uebertragungsmittel wie Riemen, Kupplungen, Zahnräder usw. nachteilig wirken kann.

b) Die Drehmomentenbildung während des Hochlaufs beim Doppelstab- und Wirbelstromläufer.

Anders dagegen verhält sich die Drehmomentenkurve des Doppelstabläufers. Vergleiche Abb. 13. Hier fällt die Hoch-

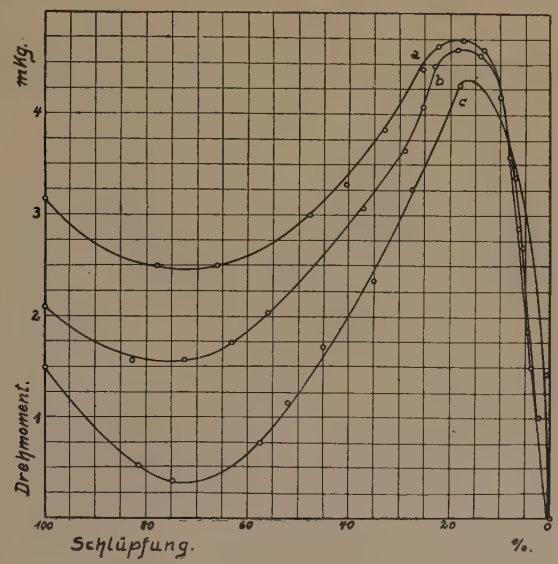


Abb. 13:
Drehmomentenkurven für den Doppelstabläufer (aus Tabelle 8—10.)
Hilfsphaseninduktivität bei Kurve a: 0,039 Henry, b: 0,069 Henry, c: 0,110 Henry.

laufkurve bei den größeren Hilfsphasenströmen im Schlüpfungsbereich 100—60% etwas ab, was insofern als nicht ungünstig zu bezeichnen ist, als im Augenblick des Einschaltens zur Ueberwindung des wesentlich größeren Reibungswiderstandes der Ruhe zunächst ein größeres Antriebsmoment erforderlich ist. Nach eingeleiteter Drehbewegung dagegen ist nur noch bei wesentlich herabgesetzten Reibungsverhältnissen eine Beschleunigungsarbeit zu leisten. Da aber im allgemeinen eine etwas größere Motorenleistung bei der Bemessung fast

durchweg gewählt wird, werden sich auch etwas größere Einsattlungen in der Drehmomentenkurve während des Hochlaufs nicht als besonders nachteilig erweisen.

Während des Anlaufs arbeiten beide Käfige beim Doppelstabläufer parallel, d. h. jeder trägt seinen Anteil zur Bildung des Gesamtdrehmomentes bei. Damit kann durch entsprechende Dimensionierung der Widerstände beider Käfige, der Größe des zwischengelegten Blechsteges sowie der gegenseitigen Lage der Käfige zueinander der Drehmomentenverlauf entscheidend beeinflußt werden. Während im allgemeinen bei Ueberwiegen des Drehmomentenanteils des Arbeitskäfigs infolge der großen Streuung im Anlauf unter starker Herabsetzung des Anfahrstromes neben einem guten Anzugsmoment auch ein zufriedenstellender Verlauf der Drehmomentenkurve erreicht wird, nimmt das Kippmoment und der Leistungsfaktor auf Grund größerer Streuung geringere Werte an. Im anderen Falle wird dagegen bei dem hohen Ohmschen Widerstand des Anlaufkäfigs der Kurvencharakter im Hochlauf bis zu mittleren Schlüpfungswerten fast vollständig von diesem bestimmt. Die sich dabei ergebende Einsattlung in der Drehmomentenkurve kurz nach Entwicklung des Anzugsmomentes hat bei nicht zu starken Ausmaßen, wie bereits auseinandergesetzt, nur geringe schädliche Auswirkung auf die Anfahrverhältnisse. Bei entsprechender Anteilgebung beider Käfige am Gesamtdrehmoment kann dann auch im einphasigen Betrieb jeder gewünschte Drehmomentenverlauf ohne nennenswerte Sattelbildungen erreicht werden.

Wie bereits erwähnt ist, wird die hohe Kippmomentenlage des gewöhnlichen Kurzschlußläufers beim Doppelstabmotor nicht erreicht, da beim Einphasenmotor durch den wesentlich größeren Einfluß der Streuung eine entsprechende Verkleinerung des maximalen Drehmomentes bedingt ist. Diese relativ niedrigere Kippmomentenlage ist innerhalb normaler Grenzen durch den Fortfall der sonst hervorgerufenen größeren Massenbeschleunigungen im Hochlauf (siehe Kurzschlußläufer) nicht als Nachteil anzusehen.

Hinsichtlich des kleinsten Drehmomentes aber in der Einsattlung der Drehmomentenkurve zeigt sich dieses in erster Linie in überaus starkem Maße von der Größe des Hilfsfeldes und der Phasenverschiebung zwischen Arbeits-

und Hilfswicklung abhängig, so daß schon bei Hilfsphasenströmen von 12 Amp. abwärts bei zwar noch guten Anzugsmomenten ein einwandfreier Hochlauf mit Last kaum mehr in Frage kommt. Auf diese Erscheinung wird noch in einem der folgenden Abschnitte näher einzugehen sein.

In ähnlicher Weise wie der Motor mit Doppelstabläufer vereinigt auch der Stromverdrängungsmotor mit Wirbel-

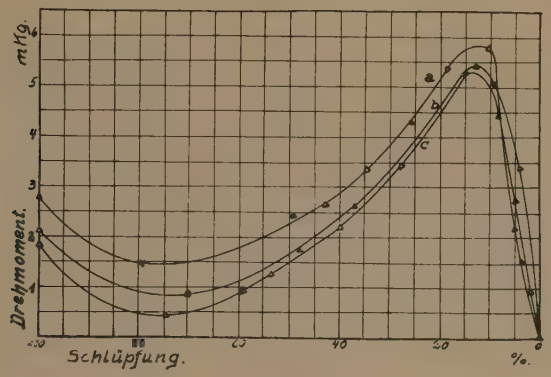


Abb. 14:

Drehmomentenkurven für den Wirbelstromläufer (aus Tabelle 20—22.)
Hilfsphaseninduktivität bei Kurve a: 0,033 Henry, b: 0,072 Henry, c: 0,080 Henry.

stromläufer neben einem guten Anzugsmoment einen zufriedenstellenden Drehmomentenverlauf während seines Hochlaufs bei größeren Hilfsphasenströmen. (Abb. 14.) Im Vergleich zum gewöhnlichen Kurzschlußläufer entwickelt der Wirbelstromläufer im Anzug ein größeres Moment als jener, das allerdings in Form einer langgestreckten Einsattlung um etwa ein Drittel seines Anzugswertes mit steigender Drehzahl zunächst abnimmt, um dann aber einer wesentlich höheren Kippmomentenlage als beim Doppelstabläufer zuzustreben. Während demnach im Bereiche niederer Drehzahlen der Kurvencharakter mehr dem des Doppelstabläufers ähnlich ist, tritt bei höheren Drehzahlen eine starke Annäherung an den gewöhnlichen Kurzschlußläufer zutage. Dieser wechselnde Kurvencharakter läßt sich in erster Linie auf die stark

wechselnde Streuung in den einzelnen Drehzahlgebieten zurückführen. Während im Anlauf infolge der hohen Läuferfrequenz die Wirbelstrombildung und damit eine starke Streuung sich in ähnlicher Weise wie beim Doppelstabläufer bemerkbar macht, tritt im Lauf im Bereich kleinerer Rotorfrequenzen in den Rotorleitern keine merkbare Wirbelstrombildung mehr auf, so daß die Drehmomentenkurve sich mehr und mehr an die des gewöhnlichen Kurzschlußläufers anschließt. Allerdings wird durch die tiefe, langgestreckte Nut auch bei kleinen Leiterfrequenzen eine stärkere Streuung als durch die runde Nut des gewöhnlichen Kurzschlußläufers bedingt sein, so daß Ueberlastbarkeit und Leistungsfaktor des gewöhnlichen Kurzschlußläufers nicht ganz erreicht werden. Vgl. Abb. 1.

In gleicher Weise wie beim Doppelstabläufer kann auch hier durch entsprechende Dimensionierung der Käfigabmessungen der Kurvenverlauf beeinflußt werden. Während aber beim Doppelstabläufer zur Erreichung eines gleichen Wirkungsgrades (bedingt durch Rotorwiderstand) durch die Aenderung der Widerstandsverhältnisse beider Käfige und der zusätzlichen Induktivität der Arbeitswicklung zwei Möglichkeiten zur Erzielung guter Anfahrverhältnisse gegeben sind, ist unter den gleichen Voraussetzungen dem Wirbelstromläufer nur als einzige Veränderliche die Höhe der Stäbe in den Rotornuten gegeben. Deshalb wird dieselbe gleichmäßige Beherrschung der Anfahrverhältnisse und des Drehmomentenverlaufs beim Wirbelstromläufer schwerer zu erreichen sein.

3. Vergleichende Gegenüberstellung der drei Läufer

a) in ihren Anfahrverhältnissen.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes soll nun eine vergleichende Gegenüberstellung aller drei Läufer von ihren Anfahrverhältnissen und ihrer Eignung im Einphasenbetrieb unter den eingangs erwähnten Voraussetzungen selbst sprechen.

Wie die aufgenommenen Kurven in Abb. 13 bereits deutlich zeigen, ist der Doppelstabläufer hinsichtlich der Gleichmäßigkeit im Drehmomentenverlauf bei größeren Hilfsphasenströmen und in der geringen während des Hochlaufs zu leistenden Beschleunigungsarbeit: ausgedrückt durch das Verhältnis des Anzugsmomentes zum Kippmoment bedeutend überlegen, während nach schon wesentlich ungünstigeren Werten des Wirbelstromläufers der gewöhnliche Kurzschlußläufer die bereits schon früher erwähnten ungünstigsten Werte aufzuweisen hat. Während dem erstrebenswertesten Wert: Anzugsmoment = Kippmoment der Doppelstabläufer weitaus am nächsten kommt, wird beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer unter gleichen Hilfsstromgrößen nur etwa zu 45 bis 50% den genannten Verhältnissen des Doppelstabläufers entsprochen. Vgl. die Abb 15 und 16 und die nachfolgende Tabelle 1.

Tabelle 1.

Induktivität der Hilfsphase Henry L	Hilfsphasenstrom Amp. J_{hi}	$M_{DA}/M_{Dmax.}$		
		gew. Kurzschlußlfr.	Doppelstablfr.	Wirbelstrlfr.
0,035	35,5	0,387	0,71	0,46
0,05	24,5	0,302	0,566	0,435
0,075	16,3	0,218	0,44	0,39
0,10	12,5	0,18	0,36	0,0
		$M_{DA}/M_{Dmin.}$		
0,035	33,5	1,0	1,29	1,93
0,05	24,5	1,0	1,23	1,95
0,075	16,3	1,0	1,43	2,62
0,10	12,5	1,0	2,44	—

Ebenfalls ungünstiger als beim Doppelstabläufer liegen

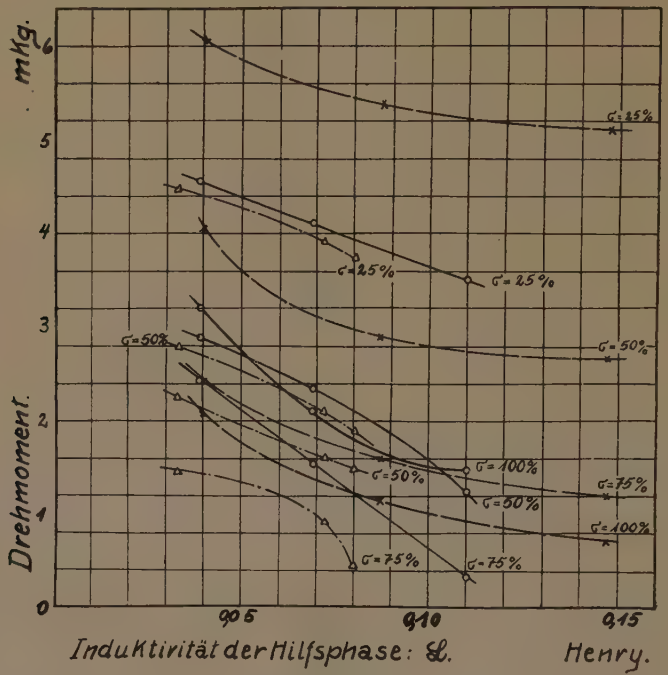


Abb. 15:
Drehmomente der drei Läuferarten für verschiedene Schlüpfungen und Hilfsphaseninduktivitäten (aus Tabelle 8—10, 14—16 und 20—22.)

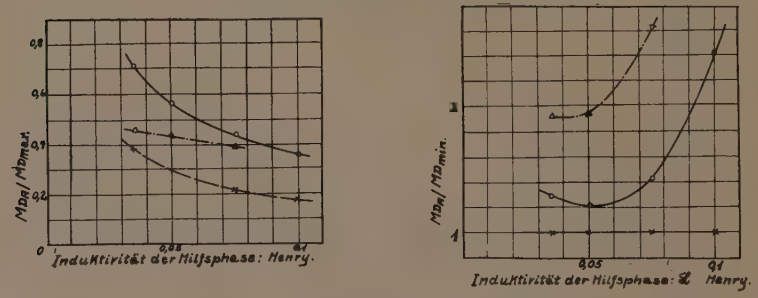


Abb. 16:
Drehmomenten-Verhältnisse bei verschiedenen Hilfsphaseninduktivitäten (aus Tabelle 1).

auch die Verhältnisse beim Wirbelstromläufer, der allerdings nur mit etwa 35 bis 10% bei fallendem Hilfsphasenstrom unter den Werten des Doppelstabläufers bleibt.

Während mit abnehmendem Hilfsphasenstrom das Momentenverhältnis beim gewöhnlichen Kurzschluß- und beim Doppelstabläufer nahezu gleichmäßig abnimmt, tritt beim Wirbelstromläufer eine fast vollständige Angleichung an den Doppelstabläufer zutage, die bei einem Hilfsphasenstrom von 16,3 Amp. nur noch etwa um 10% hinter dem Doppelstabläufer zurücksteht. Daraus ergibt sich auch wieder die schon früher beobachtete Anpassung des Wirbelstromläufers an den Doppelstabläufer in den Anlaufverhältnissen.

Hinsichtlich des Drehmomentenverhältnisses M_{DA}/M_{Dmin}. steht natürlich, wie die Hochlaufkurven (vgl. Abb. 12) beweisen, der gewöhnliche Kurzschlußläufer unerreicht da. Da ein stets ansteigender Verlauf der Drehmomentenkurve vom Anzugs- bis zum Kippmoment ohne Einsattlung und bei jeder Hilfsfeldgröße bei ihm beobachtet werden kann, zeigt das Verhältnis den höchst erreichbaren Wert „1". Wenn auch dieser angestrebte Verlauf der Drehmomentenkurve mit Rücksicht auf andere Eigenschaften der Maschine nicht immer erreicht werden kann, so wird er doch gerade bei Einphasen-Asynchromotoren mit Rücksicht auf die gegenüber den Drehstrommotoren relativ niedrige Anzugsmomentenlage immer einen gewissen idealen Zustand darstellen. Diesem angestrebten Kurvenverlauf am nächsten kommt insbesondere bei größeren Hilfsphasenströmen der Doppelstabläufer, der bei etwa $J_{hi} = 25$ Amp. seinen günstigsten Verhältniswert als ausgeprägtes Kurvenminimum anzeigt. Bei weiterer Verkleinerung der Hilfsstromstärke tritt allerdings die Sattelbildung im Drehmomentenverlauf so stark in Erscheinung, daß schon bei $J_{hi} = 12{,}5$ Amp. eine fast 2,5-fache Abnahme des Verhältniswertes gegenüber dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer zu verzeichnen ist. Im allgemeinen wird man einen Drehmomentenabfall in der Hochlaufkurve von 10 bis 15% bei knapp bemessenen Motorenleistungen mit Rücksicht auf die durch die eingeleitete Drehbewegung überwundene Reibung der Ruhe ohne Folgen für den Anlauf zulassen. Wesentlich ungünstiger liegen die Werte beim Wirbelstromläufer, der schon bei großen Hilfsströmen eine

starke Verschlechterung im Momentenverhältnis aufzuweisen hat, das sich mit abnehmender Hilfsstromgröße rasch weiter verschlechtert. Hierin zeigt sich schon sehr deutlich, daß die dadurch bedingten schlechten Anlaufverhältnisse auch schon bei kleinen Belastungen lange Anlaufzeiten erfordern werden.

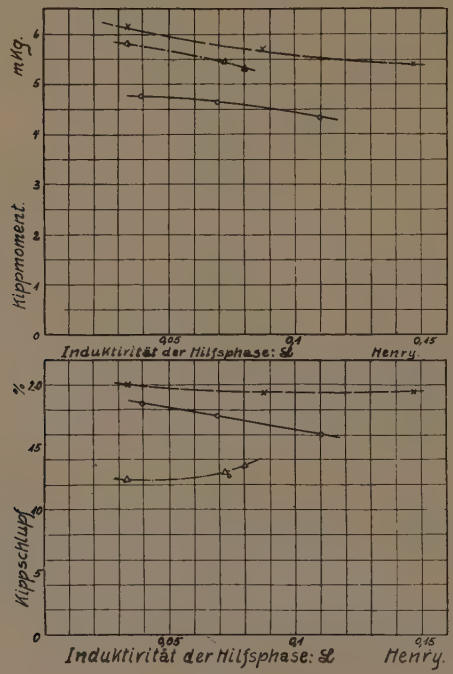


Abb. 17:
Kippmomente der drei Läufer in Abhängigkeit von der Hilfsphaseninduktivität (aus Tabelle 2).

Abb. 18:
Kippschlupf als Funktion der Hilfsphaseninduktivität bei den drei Läufern (aus Tabelle 2).

Im übrigen aber zeigen Tabelle 2 und die Abb. 17 und 18, in denen die aus den Abb. 12 bis 14 für die drei Läufer bei den angegebenen Hilfsphasen-Induktivitäten entnommenen maximalen Drehmomente (Kippmomente) und die zugehörigen Schlüpfungen (Kippschlupf) zusammengestellt sind,

deutlich den Einfluß der Größe des Hilfsfeldes auf die genannten Größen.

Tabelle 2.

Induktivität des Hilfsfeldes L in Henry	Kippmoment mkg.	Kippschlupt %	Läuferart
0,033	6,15	20	Gew. Kurzschlußläufer
0,087	5,7	18,5	„
0,147	5,4	18,5	„
0,039	4,75	18,5	Doppelstabläufer
0,069	4,65	17,5	„
0,11	4,33	16,0	„
0,033	5,85	12,5	Wirbelstromläufer
0,072	5,45	13,—	„
0,08	5,3	13,5	„

Sämtliche drei Läufer haben nur einen geringen Abfall der Kippmomentenhöhe mit zunehmender Hilfsphasen-Induktivität aufzuweisen. Das gleiche gilt auch vom Kippschlupf, der beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer zwischen 18,5 und 20% bei veränderlicher Hilfsphasen-Induktivität schwankend als wenig veränderlich anzusehen ist, während beim Doppelstabläufer eine stärkere Abnahme infolge der größeren Streuung des Motors ohne weiteres ersichtlich ist. Die beim Wirbelstromläufer an und für sich wesentlich kleinere Kippschlupflage erfährt dagegen mit wachsender Hilfsphasen-Induktivität im Schlupfbereich 12,5 bis 13,5% eine kleine Zunahme.

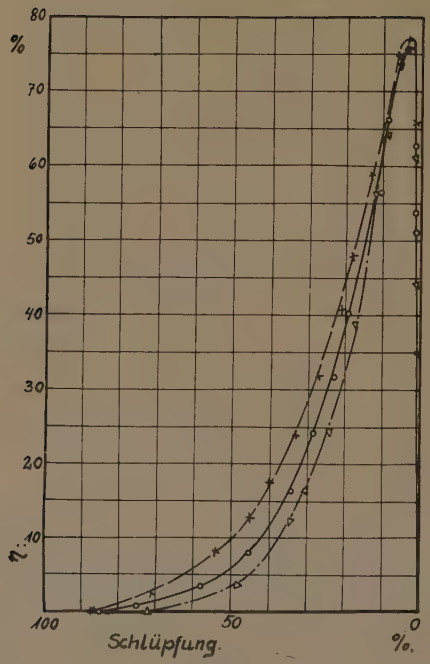


Abb. 19:
Wirkungsgrade der drei Läufer bei abgeschalteter Hilfsphase (aus Tabelle 11, 17 und 23).

Im normalen Belastungszustand bei abgeschalteter Hilfsphase zeigen die Stromverdrängungsläufer bei etwa gleichem Kippmoment (bedingt durch etwa gleiche Streuung) eine nur unwesentliche Unterlegenheit gegenüber dem mit etwas höherem Kippmoment ausgestatteten gewöhnlichen Kurzschlußläufer. Vgl. Abb. 19 bis 21. In Abb. 20 sind die Drehmomentenkurven der einzelnen Läufer bei abgeschalteter Hilfsphase als Funktion der Schlüpfung aufgetragen. Da der Drehmomentenverlauf im normalen Arbeitsbereich, wie die Kurven deutlich zeigen, bei allen drei Läufern fast gleichen Charakter aufweist, wird hier ein nennenswerter Vorteil des gewöhnlichen Kurzschlußläufers gegenüber den Stromverdrängungsläufern nicht festzustellen sein. Das gleiche gilt auch für den Kippschlupf, der in Tabelle 3 (aus den Abb. 12

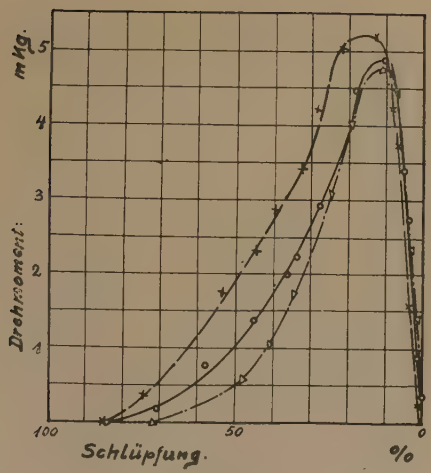


Abb. 20:

Drehmomentkurven der drei Läufer bei abgeschalteter Hilfsphase (aus Tabelle 11, 17 und 23.)

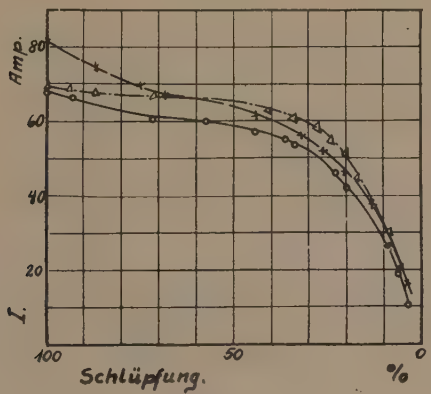


Abb. 21:

Der Stromverlauf bei abgeschalteter Hilfsphase bei den drei Läufern (aus Tabelle 11, 17 und 23).

bis 14 und 20 entnommen) zum Vergleich zusammengestellt ist.

Tabelle 3 (Kippschlupf in %).

Läufertypen	Hilfsphase eingeschaltet Bei J_{hi} = 80 Amp.	Hilfsphase abgeschaltet
Gew. Kurzschlußläufer . . .	20	15
Doppelstabläufer	18,8	12
Wirbelstromläufer	12,5	11

Zur Frage des Anzugsmomentes soll schließlich noch auf eine wesentliche Beobachtung hingewiesen werden, die besonders für den Bau kleiner Einphasenmaschinen mit geringen Rotordurchmessern von Bedeutung sein dürfte. Während die Versuchsergebnisse beim Doppelstab- und Wirbelstromläufer unabhängig von der Rotorlage ein vollständig gleichmäßiges Anzugsmoment bei jeder Hilfsphasenstärke aufzuweisen hatten, ergab der gleiche Versuch beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer eine überaus starke Abhängigkeit des Drehmomentes von der Rotorlage. Diese starke Drehmomentenschwankung wird in erster Linie auf die mit Rücksicht auf die eingangs gestellten Bedingungen wesentlich geringeren Nutenzahlen im Rotor gegenüber denen der Stromverdrängungsläufer zurückzuführen sein, zumal die zur Verbesserung des Anzugsmomentes durchgeführte Nutenschrägung beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer in gleicher Weise wie beim Doppelstabläufer vorhanden ist. Beim Wirbelstromläufer wurde, wie bereits erwähnt, eine Nutenschrägung nicht durchgeführt. Tabelle 4 gibt anschließend einen Ueberblick über die Nutenzahlenverhältnisse der drei Läufer.

Tabelle 4.

Läufertype	Statornutenzahl N_1	Rotornutenzahl N_2	$1 : N_2/N_1$
Doppelstabläufer	36	58	1 : 1,61
Wirbelstromläufer	36	44	1 : 1,22
Gew. Kurzschlußläufer . .	36	28	1 : 0,777

Die Schwankungen in der Anzugsmomentenbildung bei veränderlicher Rotorlage lassen sich auf die wechselnden Reaktanzen im Stator und Rotor, hervorgerufen durch Stator-

und Rotoroberfelder, und wechselnde Streuungsverhältnisse zurückführen. Je nach der Lage des Rotors mit der bei Kurzschlußläufern wesentlich höheren Rotorphasenzahl gegenüber der im Stator wird die Kurzschluß-Reaktanz außer von den Streufeldern auch noch von den Stator- und Rotoroberfeldern in gewissem Maße beeinflußt werden. Diese Beeinflussung hängt dabei in starkem Maße von den Nutenzahlen des Stators und Rotors ab. Während man zur Verminderung der Oberwellenbildung zweckmäßig die Nuten um eine Nutteilung schrägt, ändern sich die Streuungsverhältnisse entsprechend der Zahnlage von Stator und Rotor. Durch Ausbildung lokaler Felder um die einzelnen Nuten, die nach einer Verdrehung der Stator- gegenüber den Rotorphasen um eine halbe Spulenbreite ihren Höchstwert annehmen, ändert sich die Zahnkopfstreuung und damit auch der Kurzschlußstrom.

Während aber der Streufluß durch die Nuten und ebenso die Spulenkopfstreuung von der Nutenzahl unabhängig ist, da mit steigender Nutenzahl der magnetische Widerstand des Streuflusses im gleichen Maße wie die Durchflutung abnimmt, tritt eine Verkleinerung des Wertes der doppelt verketteten Streuung (Zickzackstreuung) mit zunehmender Nutenzahl bis zu einer gewissen Grenze ein.

Gleichzeitig mit der Aenderung der Reaktanzen bei Kurzschluß und damit des Kurzschlußstromes, was in Tabelle 5 ebenfalls zum Ausdruck kommt, ändert sich auch das Anzugsmoment.

Unter dem das Drehmoment des Grundfeldes verkleinerten Einfluß der Oberfelder nimmt das resultierende Anzugsmoment ab. Begünstigt wird diese Abnahme, wie bereits erwähnt, durch die lokale Feldbildung infolge zu kleiner Stator- oder Rotornutenzahlen oder durch gleiche Nutenzahlen in Stator und Rotor, so daß besonders bei Kurzschlußläufern mit kleinem Rotorwiderstand r_2 durch Einstellung des Läufers in die Lage der größten Reaktanz ein selbständiger Anlauf unmöglich gemacht wird. Eine Abänderung dieser schlechten Anlaufverhältnisse bringt die Wahl eines anderen Blechschnittes oder die oben erwähnte Nutenschrägung.

Tabelle 5.

J hi Amp.	M dmax mkg.	M dmin mkg.	M dmittel mkg.	J max Amp.	J min Amp.	M dmax / M dmin —
36	3,8	1,16	2,48	100	95	3,28
27	3,09	0,98	2,02	96	90	3,16
19	2,36	0,536	1,44	86	84	4,4
5	0,83	0,0	0,415	82	80	∞

Aus Tabelle 5, die sich auf Grund der gemessenen Werte für den gewöhnlichen Kurzschlußläufer ergibt, ersieht man deutlich den Einfluß der Nutenzahlen. Ein solcher macht sich bei den wesentlich höheren Nutenzahlen der Stromverdrängungsläufer beim Kurzschlußstrom und bei der Bildung des Anzugsmomentes infolge der Verkleinerung der doppelt verketteten Streuung nicht bemerkbar.

Während bei den Stromverdrängungsläufern infolge gleichmäßiger Anzugsmomentenbildung das Schwankungsverhältnis Md_{max}/Md_{min}. den Wert „eins" konstant beibehält, ergibt sich beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer eine überaus starke Zunahme des Verhältniswertes, der mit fallender Hilfsphasenstromstärke rasch den Wert „unendlich" annimmt, d. h. in einer bestimmten Rotorlage überhaupt kein Anzugsmoment mehr entwickelt.

b) Vergleichende Gegenüberstellung der drei Läufer in ihren Stromkurven.

Im Stromdiagramm des gewöhnlichen Kurzschlußläufers im einphasigen Betrieb mit abgeschalteter Hilfsphase bewegt sich bei konstanter Klemmenspannung der Vektor des Stromes auf einem Kreis, der im wesentlichen durch die Größe und Lage des synchronen Leerlaufstromes und des Kurzschlußstromes gegeben ist. Infolgedessen kann mit einigen bekannten Einschränkungen auch für den einphasigen Motor in ähnlicher Weise wie für den Drehstrommotor das Arbeitsdiagramm mit seinen Leistungs- und Verlustlinien entwickelt werden.

Anders dagegen verläuft das Stromdiagramm eines Einphasenmotors mit Wirbelstromläufer. (Abb. 22.) Im Be-

reiche kleinerer Schlüpfungen, d. h. im normalen Belastungs-

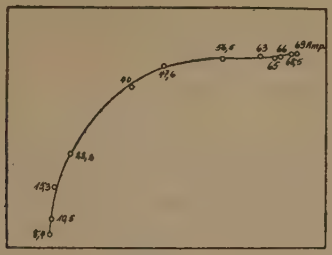


Abb. 22.
Stromdiagramm für den Wirbelstromläufer (aus Tabelle 23).
Maßstab: 1 mm = 1,5 Amp.

bereiche, schließt sich die Stromkurve stark an einen Kreis an. Mit abnehmender Drehzahl jedoch, also großen Schlüpfungen, macht sich dagegen die Stromverdrängung mit der durch sie bedingten Widerstandsvermehrung und Induktivitätsverminderung deutlich bemerkbar. Auf Grund dieser Induktivitätsverminderung tritt eine Abweichung von der bisher beobachteten Kreisform der Stromkurve auf, so daß nach dem Kurzschlußpunkt zu das Stromdiagramm nach einer flach nach oben abbiegenden Kurve verläuft.

Einen ähnlichen Verlauf hat auch die Stromkurve des Doppelstabläufers aufzuweisen. (Abb. 23.) Hier wird in

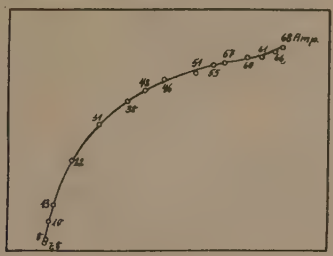


Abb. 23:
Stromdiagramm für den Doppelstabläufer (aus Tabelle 11).
Maßstab: 1 mm = 1,5 Amp.

noch stärkerem Maße die bei höheren Schlüpfungen auftretende größere Stromverdrängung mit der dadurch bedingten größeren Anteilgebung des Anlaufkäfigs an der Gesamtdrehmomentenbildung auch in dem Verlauf der Strom-

kurve zum Ausdruck kommen. Es zeigt sich deshalb hier in etwa gleicher Weise wie bei den Drehstrommotoren ein zunehmendes Abbiegen der Stromkurve von der im ersten Teil beobachteten Anpassung an einen Schmiegekreis.

Da es nicht im Rahmen dieser Arbeit liegt festzustellen, ob oder wie weit die von Punga, Lund und Böttcher gemachten Angaben zur Konstruktion der Stromkurven auch für den Einphasenmotor zutreffen, so sei doch an dieser Stelle auf den stark ähnlichen äußerlichen Verlauf der ermittelten Stromkurven zu denen von Drehstrommotoren mit gleichen Läuferkonstruktionen besonders hingewiesen.

Der Versuch einer Konstruktion des Stromdiagramms in gleicher Weise wie beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer zeigte beim Wirbelstromläufer im normalen Arbeitsbereich des Motors Abweichungen in der Stromgröße in den Grenzen 15 bis 18%, während naturgemäß beim Doppelstabläufer durch den stärkeren Einfluß der Streuung im Anlauf und das dadurch bedingte starke Abbiegen der Stromkurve noch wesentlich größere Abweichungen festzustellen waren. Damit dürfte beim Doppelstabläufer die beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer verwendete Kreiskonstruktion als zu ungenau ausscheiden.

IV. Vergleich

a) der Anfahrzeiten und Anfahrverhältnisse der einzelnen Läufer.

Während der Anlaufperiode muß der leerlaufende Motor im Augenblick des Anzugs außer dem Moment zur Ueberwindung der Ruhereibung noch eine bestimmte Zugkraft zur Beschleunigung der zu bewegenden Eigenmassen entwickeln. Mit zunehmender Drehzahl wird zwar das Ruhereibungsmoment des Anzugs auf kleinere Werte abnehmen, während die zur Beschleunigung der Eigenmassen entwickelte Zugkraft möglichst gleichmäßig bis zur Erreichung der normalen Drehzahl beibehalten werden soll. Soll außerdem der Motor noch mit einer bestimmten Last hochlaufen, dann wird eine entsprechende Erhöhung der Zugkraft zur Ueberwindung der nunmehr erschwerten Anlaufverhältnisse eintreten

müssen. Während im Drehstrombetrieb schon seit Jahren durch Verwendung von Stromverdrängungsmotoren selbst bei starker Begrenzung der Anlaufstromstärken eine Entwicklung von Anzugsmomenten in voller Höhe des normalen Momentes möglich ist, ist bei Asynchron-Einphasen-Induktionsmotoren mit gewöhnlichem Kurzschlußläufer fast durchweg nur ein Leeranlauf unter späterer Lastkupplung mittels Anlaßkupplung oder -Riemenscheibe durchführbar. Insbesondere fanden in Anbetracht der bisher beobachteten schlechten Anfahrverhältnisse des Einphasen-Induktionsmotors Fliehkraftriemenscheiben und -Kupplungen mit Zeitverzögerung Verwendung. Hierdurch wird dem Kurzschlußläufer die Möglichkeit gegeben, völlig unbelastet hochzulaufen, da zwischen Einschaltung des Motors und Eingriff der Fliehkraft eine einstellbare Zeitverzögerung eingeschaltet ist. Dadurch tritt erst bei Entwicklung größerer Drehmomente eine Belastung des Motors ein.

Da aber gerade bei kleineren Leistungen eine derartige den Anlaufverhältnissen des Einphasenmotors Rechnung tragende Anlaßvorrichtung infolge ihrer Größe, Unterbringungsmöglichkeit und Preisbildung nicht in Frage kommt, wird gleichzeitig im Hinblick auf die neuzeitlichen Läuferformen der Stromverdrängungsmotoren zu untersuchen sein, ob ihre Anlaufverhältnisse und -zeiten eine Verbesserung gegenüber der Verwendung des bisher eingebauten gewöhnlichen Kurzschlußläufers gewährleisten.

Die Anlaufszeit eines Motors ist bekanntlich bei gleichen zu beschleunigenden Massen seinem Drehmoment umgekehrt proportional, d. h. ein Motor, der zwischen $\sigma = 1$ (Anzug) und $\sigma = 0$ (Leerlauf) höhere Drehmomente entwickelt, läßt auf die Erreichung kleinerer Anlaufzeiten schließen als ein Motor mit flacher verlaufender und mit Einsattlungen versehener Hochlaufkurve. Damit wird die Anlaufzeit zurückgeführt auf die Größe des Anzugsmomentes und den Verlauf der Drehmomentenkurven während des Hochlaufs, sodaß Läuferwiderstand und -Reaktanz bei Verwendung von Stromverdrängungsläufern auch auf die Anlaufzeit einen bestimmten Einfluß ausüben werden.

Ein Vergleich der untersuchten Läufer, die etwa gleiche Massen im Leerlauf zu beschleunigen hatten, zeigte unter sonst gleichen Versuchsbedingungen fast durchweg eine

kleine zeitliche Ueberlegenheit des gewöhnlichen Kurzschluß-

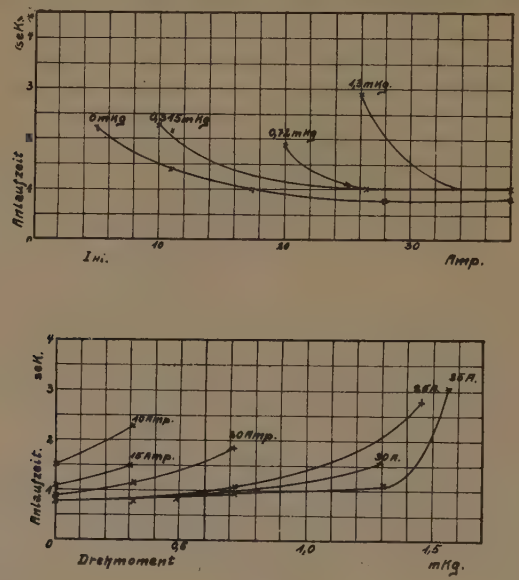


Abb. 24:

Die Anlaufzeiten beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer bei verschiedenen Belastungen und Hilfsphasenströmen. (aus Tabelle 13).

läufers gegenüber dem Doppelstabläufer, die sich allerdings mit zunehmender Hilfsstromstärke immer mehr auf die Werte des Doppelstabläufers verringert. Vgl. Abb. 24, 25 und 27. Weiter zeigte sich, daß beide Läufer auch schon bei kleinen Hilfsstromgrößen anlaufen, wobei infolge seiner gleichmäßigen Drehmomentenbildung im Anzug der Doppelstabläufer besonders weit in der minimalen Hilfsstromaufnahme herabgehen kann.

Nicht viel anders wird auch das Verhältnis der beiden Läufer bei kleineren Belastungen und gleicher Hilfsstromgröße, wo sich ebenfalls eine leichte zeitliche Ueberlegenheit des gewöhnlichen Kurzschlußläufers bemerkbar macht. Im Bereiche der höheren Belastungen tritt dagegen bereits eine leichte Ueberlegenheit des Doppelstabläufers zutage, die wohl in erster Linie auf das mit wachsendem Hilfs-

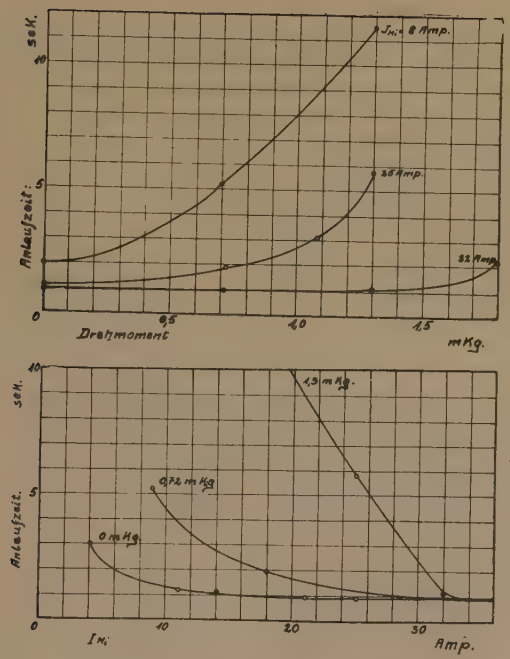


Abb. 25:

Die Anlaufzeiten beim Doppelstabläufer bei verschiedenen Belastungen und Hilfsphasenströmen (aus Tabelle 7).

phasenstrom steigende Anzugsmoment und den wesentlich vorteilhafteren Verlauf der Hochlaufmomentenkurve zurückzuführen ist.

Während, wie die Abb. 24 und 25 zeigen, bei einer mittleren Belastung von 1,3 mkg ein Anlauf des gewöhnlichen Kurzschlußläufers unterhalb einer Hilfsstromstärke von 26 Amp. infolge des stark wechselnden Anzugsmomentes nicht mehr beobachtet werden konnte, erreichte der Doppelstabläufer noch einen einwandfreien Anlauf bei etwa 18 Amp., d. h. bei einem um etwa 31% kleineren Hilfsphasenstrom. Dafür benötigte er allerdings gegenüber dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer die ungefähr vierfache Anlaufzeit. Diese Verlängerung der Anlaufzeit mit ihrer größeren Läufer-

erwärmung, die besonders bei größerer Schalthäufigkeit zu einer übermäßigen Läufererwärmung führen könnte, wird durch die größere Wärmekapazität des Doppelstabläufers ohne Schaden für die Maschine ausgeglichen.

Wesentlich anders dagegen sind die Anlaufverhältnisse und -Zeiten des Wirbelstromläufers (Abb. 26). Hier wird bereits bei einem Hilfsphasenstrom unter 18 Amp. selbst

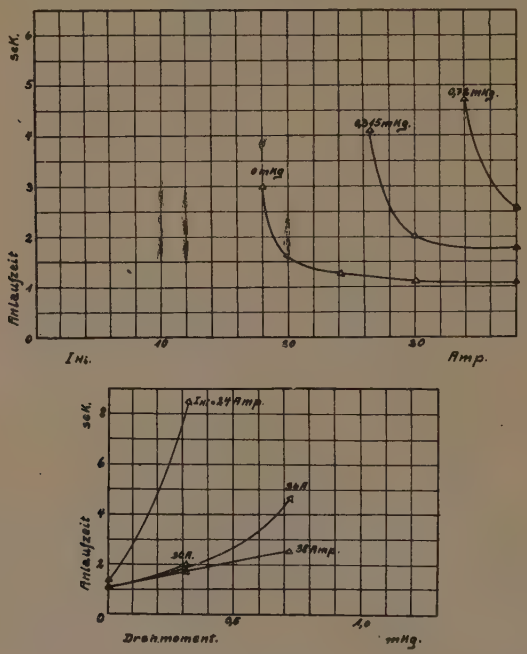


Abb. 26:
Die Anlaufzeiten beim Wirbelstromläufer bei verschiedenen Belastungen und Hilfsphasenströmen (aus Tabelle 19).

bei Leerlauf infolge der starken Einsattlung ein selbständiger Anlauf nicht mehr zu erzielen sein. Der Motor läuft zwar mit sehr kleiner Drehzahl an, die aber bald im Schlüpfungsbereich von 80 bis 70% als Schleichdrehzahl auf 0 absinkt. Diese ungünstigen Anlaufverhältnisse werden in erster Linie darauf zurückgeführt, daß sich im allgemeinen beim Wirbelstromläufer die Einsattlung in den Hochlaufkurven über einen

größeren Schlüpfungsbereich erstreckt und auch die Stator- und Rotornutenzahlen das nicht gerade günstige Verhältnis 1 : 1.22 aufweisen. Dadurch ergibt sich wegen der starken sekundären Streuung in diesem Schlupfbereich eine durch das Zusammenwirken von Stator- und Rotornuten starke Oberfeldbildung und damit eine „Kleben" des Läufers.

Nicht viel günstiger liegen die Werte bei mittleren Belastungen, wo z. B. gegenüber dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer beim gleichen Hilfsphasenstrom von 27 Amp. ein Anlauf mit einer mittleren Belastung von 0,315 mkg in etwa 3,3-facher Zeit erreicht wird. Bei höheren Belastungen wird die zeitliche Differenz im Anlauf noch mehr zu Ungunsten des Wirbelstromläufers ausschlagen.

Zusammenfassend gibt Abb. 27 eine Uebersicht über die erreichbaren Anlaufzeiten bei verschiedenen Belastungen

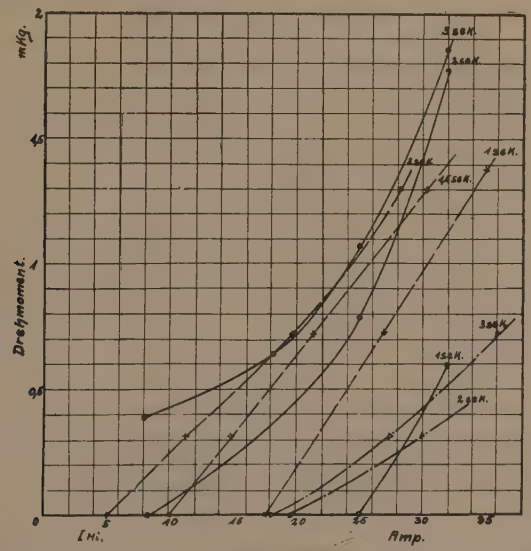


Abb. 27:
Zeitkurven für verschiedene Belastungsmomente und Hilfsphasenströme (aus Abb. 24—26).

und Hilfsphasenströmen. Bei allen drei Läufern werden mit steigendem Hilfsphasenstrom und konstanter Belastung abnehmende Anlaufzeiten erreicht. Im allgemeinen sind bei

kleinen Hilfsphasenströmen und mittleren Belastungen Doppelstab- und gewöhnlicher Kurzschlußläufer im Hinblick auf die Anlaufzeit nur wenig verschieden, während bei höheren Hilfsstromstärken und größeren Belastungen sich sogar noch eine kleine zeitliche Ueberlegenheit des Doppelstabläufers bemerkbar macht. Demgegenüber zeigt der Wirbelstromläufer wesentlich ungünstigere Ergebnisse, die schon bei kleinen Belastungen zur Erreichung annehmbarer Anlaufzeiten große Hilfsphasenströme erforderlich machen. Auch hier läßt sich eine Verbesserung der Anlaufverhältnisse durch eine günstiger verlaufene Drehmomentenkurve und Vermeidung starker, langgestreckter Einsattlungen durch Wahl anderer Blechschnitte erreichen.

b) Anfahrtzeit und Anlauferwärmung bei den einzelnen Läufern.

Die Frage der Anlaufverhältnisse soll nicht abgeschlossen werden, ohne noch vorher im Zusammenhange mit den zeitlichen Anlaufverhältnissen kurz die bei den Versuchen beobachtete Temperaturzunahme der Rotorwicklung gestreift zu haben.

Allgemein nimmt mit zunehmender Motordrehzahl im Anlauf die Beanspruchung der Rotorwicklung ab. Hand in Hand mit der elektrischen Beanspruchung geht damit auch die thermische. Während bei keinem der drei Läufer unzulässige Erwärmungen auftraten, zeigte sich dagegen bei intermittierendem Betriebe mit größerer Schalthäufigkeit, wie sie beispielsweise in der Reklametechnik, Elektromedizin und Haushaltgeräten gefordert wird, eine beträchtliche Temperaturzunahme der Rotorwicklung unter starker Beeinflussung der Anlaufverhältnisse.

Besonders der gewöhnliche Kurzschlußläufer zeigte trotz günstiger Hochlaufzeiten eine starke Erwärmung, die in erster Linie auf die im Vergleich zu den anderen Läuferausführungen geringe Staboberfläche und dadurch kleine Wärmeübergangsfläche zum Rotoreisen zurückgeführt werden kann.

Viel günstiger liegen die Verhältnisse bei den Stromverdrängungsläufern, da hier trotz längerer Anlaufzeiten einmal kleinere Anlaufströme und zum anderen durch lang-

gestreckte Nutformen eine intensivere Wärmeabfuhr zum Eisen erzielt wird. Während beim Doppelstabläufer der während des Hochlaufs auch thermisch stark beanspruchte Anlaufkäfig nach Erreichung einer bestimmten Hochlaufdrehzahl fast vollständig durch die Arbeitswicklung elektrisch und thermisch entlastet wird, ist der gewöhnliche Kurzschlußläufer mit nur einer Wicklung einer dauernden Beanspruchung unterworfen. Noch günstiger liegen die Verhältnisse beim Wirbelstromläufer mit seinen langgestreckten, tief in das Rotoreisen eingebetteten Leitern, die eine besonders intensive Wärmeabgabe an das Rotoreisen ermöglichen. Wenn hier auch von allen drei Läufern die ungünstigsten Anlaufverhältnisse in zeitlicher Hinsicht vorherrschen, so zeigte sich doch keine größere Wärmeentwicklung als beim Doppelstabläufer. Dies läßt sich darauf zurückführen, daß zur Abfuhr der Anlaufwärme trotz Verteilung des Rotorstromes bei der Stromverdrängung auf nur einen durch die Drehzahl bezw. Frequenz bedingten Teil des Gesamtquerschnittes von Anfang an bereits der gesamte Querschnitt wärmeleitend an das Rotoreisen zur Verfügung steht, da bei der guten Leitfähigkeit des verwendeten Materials (Kupfer) auch starke lokale Erwärmungen sich schnell auf andere weniger beanspruchte Querschnittsteile ausbreiten können. Damit dürfte auch bei schwierigen Anlaufverhältnissen die thermische Beanspruchung der Stromverdrängungsmotoren günstiger als die des gewöhnlichen Kurzschlußläufers anzusprechen sein.

V. Zusammenfassung und Gesichtspunkte zur Weiterentwicklung von Einphasen-Asynchronmotoren bis zu Leistungen von etwa 10 KW.

Nach eingehender Untersuchung unter etwa gleichen elektrischen und mechanischen Bedingungen werden beide Stromverdrängungsläufer einem gewöhnlichen Kurzschlußläufer vergleichend gegenüber gestellt und an Hand der Versuchswerte auf ihre Anlaufverhältnisse und -Zeiten hin untersucht.

Das Anzugsmoment ist demnach beim Doppelstabläufer wesentlich größer als beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer

und beträgt schon bei kleinen Hilfsphasenströmen etwa das 1,5-fache des gewöhnlichen Kurzschlußläufers. Mit einer Steigerung der Hilfsstromstärke tritt allerdings eine geringe Abnahme des genannten Wertes ein.

Noch bessere Werte im Anzug hat der untersuchte Wirbelstromläufer aufzuweisen, der bei kleinen Hilfsphasenströmen sogar fast das doppelte Anzugsmoment gegenüber dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer entwickelt. Mit wachsender Hilfsstromstärke tritt jedoch eine starke Abnahme des genannten Verhältniswertes ein.

Diese gute Momentenbildung im Anzug bei den Stromverdrängungsmotoren ist in erster Linie mit auf die schmalen gestreckten Nutformen und die dadurch erreichten wesentlich größeren Nutenzahlen als beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer zurückzuführen. Dadurch wird ein fast gleichmäßiges Drehmoment unabhängig von der Rotorlage im Anzug erzielt, demgegenüber sich beim gewöhnlichen Kurzschlußläufer ein starker Nuteneinfluß unter starker Herabsetzung des mittleren Drehmomentes bemerkbar macht.

Der Verlauf der Drehmomentenkurve im Hochlauf ist, wie die Kurvenwerte (Abb. 12—14) zeigen, beim Doppelstabläufer besonders günstig, da hier im Gegensatz zum gewöhnlichen Kurzschlußläufer nicht die hohe Kippmomentenlage mit dem sich auf die Uebertragungsorgane und die angetriebene Maschine oft ungünstig auswirkenden Momentenüberschuß eintritt, sondern das für den Anzug geforderte größere Moment mit nur geringer Abnahme in beachtlicher Höhe während des Hochlaufs beibehalten wird.

Im übrigen aber zeigen die Drehmomentenkurven aller drei Läufer im Verlauf eine starke Anpassung an Drehstrommotoren mit gleichen Läuferformen. Hinsichtlich des Einschaltstromes ergibt sich trotz Entwicklung wesentlich größerer Anzugsmomente bei den Stromverdrängungsmotoren noch eine beachtliche Verminderung des Stromes gegenüber dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer. Mit Rücksicht auf die enggezogenen Grenzen der Anschlußbedingungen dürfte hierin wohl der größte Vorteil der Verwendung neuzeitlicher Läuferformen auch im Einphasenbetrieb liegen.

Eine Verringerung der Anlaufzeit ergibt sich im allgemeinen mit steigender Hilfsstromstärke. Bei kleineren Belastungen besitzt zwar der gewöhnliche Kurzschlußläufer auf

Grund seiner günstig verlaufenden Momentenkurve eine kleine zeitliche Ueberlegenheit über den Doppelstabläufer, die allerdings mit wachsender Hilfsstromstärke und Belastung sich immer mehr zu Gunsten des Doppelstabläufers verschiebt. Die dagegen wesentlich längeren Anlaufzeiten des Wirbelstromläufers lassen sich auf den ungünstigen Verlauf der Drehmomentenkurve infolge der starken Sattelbildung zurückführen, sodaß hier betriebstechnisch keine günstigen Werte erreicht werden. Durch Wahl anderer Blechschnitte und Undimensionierung der Wicklung dürften aber auch hier erträglichere Werte zu erreichen sein.

Aus dem in den vorhergehenden Abschnitten dargelegten ergibt sich somit auch im einphasigen Betrieb durch die Verwendung von Stromverdrängungsläufern, besonders in der Form des Doppelstabläufers, in elektrischer und betriebstechnischer Hinsicht eine Reihe von Vorteilen. Haben diese in elektrischer Hinsicht in erster Linie in wesentlich verbesserten Anlaufverhältnissen ihren Niederschlag gefunden, so ergeben sich auch in konstruktiver Hinsicht, besonders auch bei größeren Leistungen bis etwa 10 KW, wo bisher mit Rücksicht auf die Anfahrverhältnisse nur Schleifringläufer Verwendung fanden, durch den Einbau oben erwähnter Kurzschlußläuferformen ähnliche Vorteile wie beim Drehstrombetrieb, sodaß auf ihre Aufzählung an dieser Stelle verzichtet werden kann.

Da heute mit Rücksicht auf Vereinfachung der Fabrikation und Verbilligung der Fertigfabrikate bei größeren Leistungen gern auf entsprechende Drehmotorentypen zurückgegriffen wird, ergibt sich damit durch Umschaltung des Stators für einphasigen Betrieb die Möglichkeit einer weitgehenden Beschränkung der herzustellenden Motorentypen.

Aber auch bei Motoren kleiner Leistungen, die eine dem Verwendungszweck entsprechende eigene konstruktive Formgebung erfordern, dürften unter Beachtung vorliegender Versuchsergebnisse weitere Anregungen zur Verbesserung der bisher beobachteten schlechten Anlaufverhältnisse gegeben sein. Insbesondere dürften gerade im Bereiche kleiner Leistungen durch Verwendung von Stromverdrängungsmotoren bei gleichen Läuferabmessungen infolge der langgestreckten, schmalen Nutenformen größere Nutenzahlen

und damit bessere Anlaufbedingungen zu erreichen sein. Außerdem dürften dadurch auch die mit Rücksicht auf die gedrängte Bauform besonders bei Einbaumotoren bisher beobachteten ungünstigen Abkühlungsverhältnisse durch die bessere Leitfähigkeit der langgestreckten Nutformen sich wesentlich günstiger gestalten.

Der demgegenüber oft angeführte Nachteil eines höheren Preises bei Verwendung von Stromverdrängungsmotoren dürfte gegenüber dem Schleifringläufer sich von selbst zu Gunsten erstgenannter Läuferformen erledigen. Das gleiche gilt auch für den Wirbelstromläufer, da sämtliche Einstabläufer keinen Preisunterschied gegeneinander aufzuweisen haben. Bei Verwendung eines Doppelstabläufers dagegen tritt unter Zugrundelegung gleicher Leistung und Drehzahl nur ein geringer Preisaufschlag ein, der im Vergleich zu dem gewöhnlichen Kurzschlußläufer vollauf gerechtfertigt ist durch die besonders im Einphasenbetrieb wesentlich verbesserten Anlaufbedingungen. Abgesehen von der durch das höhere Anzugsmoment beim Doppelstabläufer evtl. gesparten Fliehkraftkupplung oder -Riemenscheibe würde eine Preisgegenüberstellung unter Verwendung entsprechend umzuschaltender Drehstrommotoren auf Einphasenbetrieb unter Zugrundelegung einer Preisliste von 1932 von Siemens und Schuckert folgende Werte zeigen:

Motorleistung: 3 KW; 1500 Umdr./Min.; 125/220 Volt.
Einstabläufer 195 RM.
Doppelstabläufer 210 RM.

Daraus ergibt sich für den Doppelstabläufer nur eine unwesentliche Preiserhöhung, sodaß auch in dieser Hinsicht einer Verwendung der Stromverdrängungsmotoren im Einphasenbetrieb kein Nachteil erwachsen würde.

Doppelstabläufer.

Tabelle 6:

(Ausgewertet in den Abb. 8—11.)

Bestimmung des Anzugsmomentes bei veränderlicher Hilfsphaseninduktivität bei U = 380 Volt const.

J_{hi} Amp.	$L = \frac{U_{Dr}}{J_{hi} \cdot \omega}$ Henry	N_{a_t} KW	J Amp.	$M_d = G \cdot l$ mkg.
36	0,0344	15,38	116	3,45
24,8	0,0483	15,2	92	2,68
22	0,055	15,1	86	2,5
17	0,072	15,23	82	2,05
15,5	0,079	15,53	78	1,92
9	0,108	15,6	75	1,10
8,6	0,144	15,7	72	1,03
7,8	0,158	15,75	72	0,943
6,4	0,194	15,75	70	0,766
5,7	0,216	15,78	70	0,65

Tabelle 7:

(Ausgewertet in den Abb. 23 und 27.)

Bestimmung der Anlaufzeit bei veränderlicher Hilfsphaseninduktivität bei U = 380 Volt const.

J_{hi} Amp.	$L = \frac{U_{Dr}}{J_{hi} \cdot \omega}$ Henry	t sek.	$M_d = G \cdot l$ mkg.	J_{hi} Amp.	$L = \frac{U_{Dr}}{J_{hi} \cdot \omega}$ Henry	t sek.	$M_d = G \cdot l$ mkg.
40	0,0306	0,8	0	32	0,036	1,1	1,3
25	0,049	0,90	0	25	0,049	5,8	1,3
21	0,058	0,90	0	18	0,07	11,5	1,3
14	0,087	1,1	0	12	0,108	kein Anlauf!	
11	0,112	1,2	0				
4	0,31	3,0	0				
32	0,0366	1,0	0,72				
25	0,048	1,9	0,72				
18	0,07	2,1	0,72				
0,5	0,144	5,2	0,72				

Tabelle 8:

(Ausgewertet in den Abb. 13, 15—18.)

Drehmomentenkurve bei eingeschalteter Hilfsphase bei U = 380 Volt.

Induktivität der Hilfsphase: L = 0,039 Henry.

J_{hi} Amp.	J Amp.	N_1 KW	n Umdr./min.	$\sigma = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100$ %	$M_d = G \cdot l$ mkg.
31	90	25,2	330	78	2,45
	87	24,9	510	66	2,52
	87	24,9	775	48,3	3,0
	87	24,8	890	40,7	3,32
	81	24,6	1000	33,3	3,85
	78	24,3	1120	25,4	4,44
	67,1	23,4	1240	17,3	4,73
	60	21,6	1350	10	4,17
	54	19,2	1420	5,33	2,68
	51	18,6	1440	4	1,92
	48	17,4	1460	2,67	1,01

Tabelle 9:

(Ausgewertet in den Abb. 13, 15—18.)

Drehmomentenkurve bei eingeschalteter Hilfsphase bei U = 380 Volt.

Induktivität der Hilfsphase: L = 0,069 Henry.

J_{hi} Amp.	J Amp.	N_1 KW	n Umdr./min.	$\sigma = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100$ %	$M_d = G \cdot l$ mkg.
16,5	77	20,8	255	83	1,54
	76	21,4	410	72,6	1,57
	75,6	21,2	650	56,6	2,04
	73	21,2	740	50,6	2,38
	69	20	940	37,3	3,08
	65	19,6	1060	29,3	3,64
	63,8	19,4	1120	25,4	4,06
	56	18,4	1220	18,6	4,65
	53	17,6	1290	14	4,62
	49	16,8	1340	10,7	4,4
	38	13,6	1400	6,67	2,88
	33	11,6	1430	4,67	1,85

Tabelle 10:

(Ausgewertet in den Abb. 13, 15—18.)

Drehmomentenkurve bei eingeschalteter Hilfsphase bei $U = 380$ Volt.

Induktivität der Hilfsphase: $L = 0{,}11$ Henry.

J_{hi} Amp.	J Amp.	N_1 KW	n_2 Umdr. / min.	$\sigma = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100$ %	$M_d = G \cdot l$ mkg.
12,0	64	14,8	280	81,4	0,5
	63	14,75	375	75	0,35
	62	14,7	635	57,5	0,75
	60	14,6	720	52	1,16
	58	14,4	825	45	1,73
	53	14,0	975	35	2,34
	50	13,0	1085	27,6	3,25
	43	12,2	1230	18	4,28
	25	6,4	1400	6,7	3,58
	13	0,8	1475	1,67	1,45

Tabelle 11:

(Ausgewertet in den Abb. 1, 19—21 und 23.)

Belastung bei abgeschalteter Hilfsphase. $U = 380$ Volt.

J Amp.	N_{a_1} WK	$\cos\varphi = \frac{N_{a_1}}{U \cdot J}$ —	n_2 Umdr / min.	$\sigma = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100$ %	$M_d = G \cdot l$ mkg.	$N_2 = \frac{1{,}03 \cdot M_d \cdot n}{1000}$ KW	$\eta = \frac{N_2}{N_{a_1}}$ %
66	15,0	0,60	100	93,3	0,0	0,0	0
63	14,7	0,615	225	85	0	0	0
61	14,4	0,62	430	71,3	0,18	0,345	2,4
60	14,3	0,63	630	58	0,78	0,506	3,6
57	14,0	0,65	830	44,7	1,38	1,18	8,4
55	13,8	0,66	950	36,7	2,02	1,98	14,3
51	13,3	0,69	1080	28	2,9	3,24	24,4
46	13,0	0,743	1160	23,7	3,43	4,1	31,5
42	12,4	0,78	1200	20	4,06	5,0	40,4
38	11,6	0,805	1330	11,3	4,77	6,55	56,5
31	9,6	0,817	1370	8,7	4,48	6,34	66,0
22	6,8	0,81	1400	6,7	3,52	5,08	75,0
13	3,4	0,69	1460	2,67	1,72	2,59	76,2
10	2,53	0,63	1470	2	1,05	1,59	63,0

Gewöhnlicher Kurzschlußläufer.

Tabelle 12:

(Ausgewertet in den Abb. 8—11.)

Bestimmung des Anzugsmomentes bei veränderlicher Hilfsphaseninduktivität bei U = 380 Volt.

J_{hi} Amp.	$L = \frac{U_{Dr.}}{J_{hi} \cdot \omega}$ Henry	N_{al} KW	J Amp.	$M_d = G \cdot l$ mkg.
36	0,033	16,0	110	2,48
27	0,044	16,0	96	2,02
26	0,047	16,3	94	1,90
19	0,064	16,4	86	1,44
5,5	0,234	16,8	82	0,44
5,0	0,25	16,85	81	0,41
3,0	0,416	16,9	80	0

Tabelle 13:

(Ausgewertet in den Abb. 24 und 27.)

Bestimmung der Anlaufzeit bei veränderlicher Hilfsphaseninduktivität bei U = 380 Volt.

J_{hi} Amp.	$L = \frac{U_{Dr.}}{J_{hi} \cdot \omega}$ Henry	t sek.	$M_d = G \cdot l$ mkg
39	0,031	0,8	0
28	0,043	0,8	0
17,5	0,07	1,0	0
11	0,11	1,4	0
9	0,136	1,8	0
5	0,244	2,25	0
38	0,032	1,0	0,315
24	0,051	1,0	0,315
16	0,076	1,4	0,315
10	0,122	2,3	0,315
38	0,032	1,0	0,72
25	0,049	1,1	0,72
20	0,061	1,9	0,72
39	0,031	1,0	1,3
26	0,047	2,9	1,3
20	0,061	kein Anlauf!	1,3
38	0,032	3,1	1,45

Tabelle 14:

(Ausgewertet in den Abb. 12 und 15—18.)

Drehmomentenkurve bei eingeschalteter Hilfsphase bei U = 380 Volt.
Induktivität der Hilfsphase: L = 0,033 Henry.

J_{hi} Amp.	J Amp.	N_1 KW	n_2 Umdr./min.	$\sigma = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100$ %	$M_d = G \cdot l$ mkg.
36	110	28,7	270	82	2,25
	109	28,4	345	72	2,38
	108	28,3	520	65,4	2,79
	102	28,1	760	49,3	4,12
	97	28,0	950	36,7	5,28
	92	27,8	1090	27,3	5,85
	84	27,3	1220	18,7	6,12
	76	26,4	1320	12	5,6
	67	23,6	1380	8	3,97
	57	19,2	1410	6	1,65
	54	18,0	1470	2	0,49

Tabelle 15:

(Ausgewertet in den Abb. 12 und 15—18.)

Drehmomentenkurve bei eingeschalteter Hilfsphase bei U = 380 Volt.
Induktivität der Hilfsphase: L = 0,087 Henry.

J_{hi} Amp.	J Amp.	N_1 KW	n_2 Umdr./min.	$\sigma = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100$ %	$M_d = G \cdot l$ mkg.
14,2	90	22	390	74	1,61
	87	21,8	475	68,5	1,8
	85	21,7	680	54,7	2,58
	84	21,6	765	49	3,—
	78	21,4	920	38,7	3,92
	72	21,3	1095	27	4,9
	57	18,2	1270	15,3	5,61
	55,2	18,0	1310	12,7	5,6
	30	12,0	1410	6	2,24

Tabelle 16:

(Ausgewertet in den Abb. 12 und 15—18.)

Drehmomentenkurve bei eingeschalteter Hilfsphase bei U = 380 Volt.
Induktivität der Hilfsphase: L = 0,147 Henry.

J_{hi} Amp.	J Amp.	N_1 KW	n_2 Umdr. / min.	$\sigma = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100$ %	$M_d = G \cdot l$ mkg.
8,8	83	19,2	200	86,6	0,925
	82	19,2	400	73,5	1,3
	77	19,1	630	58	2,05
	75	19,1	775	48,3	2,8
	68,5	19,0	980	34,7	3,99
	60	18,0	1165	22,3	5,15
	54	16,6	1220	18,7	5,4
	39	12,9	1340	10,7	4,07
	36	11,9	1410	6	2,44
	18	6,9	1450	3,33	0,925

Tabelle 17:

(Ausgewertet in den Abb. 1 und 19—21.)

Belastung bei abgeschalteter Hilfsphase. U = 380 Volt.

J Amp.	N_{a_1} KW	$\cos\varphi = \frac{N_{a1}}{J \cdot U}$ —	n_2 Umdr. / min.	$\sigma = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100$ %	$M_d = G \cdot l$ mkg.	$N_2 = \frac{1{,}03 \cdot M \cdot n}{1000}$ KW	$\eta = \frac{N_2}{N_{a_1}}$ %
75	15,4	0,54	200	86,7	0	0	0
70	15,3	0,575	375	75	0,358	0,138	0,905
67	15,2	0,597	690	54	1,74	1,24	8,2
58	15,1	0,69	900	40	2,88	2,67	17,7
52	14,2	0,718	1100	26,7	3,95	4,48	31,6
41	12,4	0,795	1230	18	4,7	5,59	48
39,8	11,8	0,78	1300	13,3	5,2	6,59	58,8
23	7,2	0,824	1400	6,67	3,776	5,43	75,4
17,9	5,2	0,764	1420	5,34	2,73	4,0	77
11,6	3,—	0,682	1440	4	1,56	2,31	77
9,6	1,4	0,384	1470	2	0,5	0,756	54
9,6	0,8	0,219	1480	1,33	0,27	0,41	51,3

Tabelle 18:

(Ausgewertet in den Abb. 8—11.)

Bestimmung des Anzugsmomentes bei veränderlicher Hilfsphaseninduktivität bei U = 380 Volt.

J_{hi} Amp.	$L = \frac{U_{Dr.}}{J_{hi} \cdot \omega}$ Henry	N_l KW	J Amp.	$M_d = G \cdot l$ mkg.
37	0,0314	12,3	116	2,84
25	0,048	12,6	94,5	2,51
17	0,071	12,9	82	2,12
9	0,136	13,14	75	1,47
7,8	0,159	13,3	74	1,36
6,3	0,196	13,36	72	1,06
6	0,206	13,4	71,8	1,03
5,2	0,238	13,46	71	0,88

Tabelle 19:

(Ausgewertet in den Abb. 26 und 27.)

Bestimmung der Anlaufzeit bei veränderlicher Hilfsphaseninduktivität bei U = 380 Volt.

J_{hi} Amp.	$L = \frac{U_{Dr.}}{J_{hi} \cdot \omega}$ Henry	t sek.	$M_d = G \cdot l$ mkg.
38	0,032	1,1	0
24	0,051	1,3	0
20	0,061	1,6	0
16	0,076	kein Anlauf!	0
38	0,032	1,8	0,315
36	0,034	1,8	0,315
30	0,041	2	0,315
25	0,049	8,5	0,315
38	0,032	2,6	0,72
34	0,036	4,7	0,72
30	0,041	kein Anlauf!	0,72
38	0,032	kein Anlauf!	1,08

Tabelle 20:

(Ausgewertet in den Abb 14—18.)

Drehmomentenkurve bei eingeschalteter Hilfsphase bei U = 380 Volt.
Induktivität der Hilfsphase: L = 0,033 Henry.

J_{hi} Amp.	J Amp.	N_1 KW	n_2 Umdr | min.	$\sigma = \frac{n_1-n_2}{n_1} \times 100$ %	$M_d = G \cdot l$ mkg
34	96	25,8	310	79,3	1,5
	95,5	25,6	760	49,3	2,5
	95	25,4	865	42,7	2,65
	93	25,2	980	34,7	3,34
	90	25,0	1110	26	4,3
	84	24,3	1220	18,7	5,37
	75	22,8	1345	10,6	5,8
	55,2	18	1445	3,67	1,55

Tabelle 21:

(Ausgewertet in den Abb 14—18.)

Drehmomentenkurve bei eingeschalteter Hilfsphase bei U = 380 Volt.
Induktivität der Hilfsphase: L = 0,072 Henry.

J_{hi} Amp.	J Amp.	N_1 KW	n_2 Umdr | min.	$\sigma = \frac{n_1-n_2}{n_1} \times 100$ %	$M_d = G \cdot l$ mkg.
17,5	93	20,8	540	70,6	0,92
	81	20,6	790	47,4	1,75
	78	20,4	950	36,7	2,6
	75	20,6	1110	26	3,71
	69	20	1135	24,3	4,61
	61,2	19,8	1300	13,3	5,43
	49,2	17,4	1360	9,3	5,12
	37,2	14,4	1445	3,67	3,4
	33	11,4	1460	2,67	1,06

Tabelle 22:

(Ausgewertet in den Abb 14—18.)

Drehmomentenkurve bei eingeschalteter Hilfsphase bei U = 380 Volt.
Induktivität der Hilfsphase: L = 0,08 Henry.

J_{hi} Amp.	J Amp.	N_1 KW	n_2 Umdr / min.	$\sigma = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100$ %	$M_d = G \cdot l$ mkg.
16	80	19,5	380	74,5	0,45
	79	19,3	610	59,3	0,96
	78	19,2	690	54	1,3
	75	19	900	40	2,2
	72	18,8	1075	28,3	3,45
	69	18,3	1140	24	3,8
	60,5	17,9	1270	15,3	5,3
	45	16,8	1370	8,67	4,46
	33	13,6	1425	5	2,76
	24	10,8	1470	2	0,95

Tabelle 23:

(Ausgewertet in den Abb. 1 und 19—22.)

Belastung bei abgeschalteter Hilfsphase: U = 380 Volt.

J Amp.	N_{a_1} KW	$\cos\varphi = \frac{N_{a_1}}{U \cdot J}$	n_2 Umdr. / min.	$M_d = G \cdot l$ mkg.	$N_2 = \frac{1{,}03 \cdot M_d \cdot n}{1000}$ KW	$\eta = \frac{N_2}{N_{a_1}}$ %	$\sigma = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100$ %
69	14,8	0,565	90	0	0	0	94
68,5	14,7	0,564	185	0	0	0	87,5
66	14,4	0,575	420	0	0	0	72
65	14,3	0,58	775	0,58	0,463	3,24	483
63	14,3	0,597	880	1,13	1,03	7,2	41,3
56,6	14,1	0,656	1140	3,14	3,58	25,4	24
47,6	13,8	0,763	1240	4,25	5,4	39,1	17,3
40	12,0	0,789	1320	4,75	6,46	53,8	12
32,2	9,788	0,798	1370	4,47	6,3	64,3	8,7
22,4	7,0	0,822	1420	3,5	5,12	73,1	5,3
15,3	4,6	0,792	1450	2,35	3,51	76,3	3,34
10,5	2,12	0,532	1475	0,92	1,4	66	1,67
8,4	0,88	0,275	1485	0	0	0	1,0

Literaturverzeichnis.

E. Arnold: Die Wechselstromtechnik: Band V, 1. Teil. Die Induktionsmaschinen. 1923.

A. Thomälen: Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik.

F. Punga und O. Raydt: Drehstrommotoren mit Doppelkäfiganker und verwandte Konstruktionen. 1931.

E. v. Rziha und J. Seidener: Starkstromtechnik Band I. 1930.

G. Jahn: Messungen an elektrischen Maschinen. 1925.

M. Liwschitz: Käfigankermotoren mit durch Stromverdrängung verbesserten Anlaufverhältnissen. Aus Siemens-Zeitschrift Heft 4. 1928.

— Der Anlauf- und Bremsvorgang bei Asynchronmotoren mit Wirbelstromläufer. Aus Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemenskonzern IV. Band, Heft 1. 1925.

Lebenslauf.

Geboren am 26. März 1902 zu Ohlau in Schlesien als Sohn des Bäckermeisters Max Lampert.

Ab Ostern 1908 Besuch der Volksschule und ab Ostern 1912 des Hum. Gymnasiums zu Ohlau.

Ostern 1922 Ablegung der Reifeprüfung.

Nach halbjähriger Praktikantenausbildung im Herbst 1922 an der Technischen Hochschule zu Breslau immatrikuliert.

Im Februar 1927 Ablegung der Diplom-Hauptprüfung in Fachrichtung Elektrotechnik.

Von Mai 1927 bis März 1929 Dozent für Elektrotechnik an der Ingenieurschule Technikum Lemgo/Lippe.

Anschl. bis 31. Januar 1930 auf dem Versuchsfeld der Kleinmotorenfabrik der AEG-Berlin Fabriken Brunnenstr. tätig.

Vom 1. Februar 1930 bis zum heutigen Tage Dozent für Elektrotechnik an der städtischen Ingenieurschule Kyffhäuser-Technikum in Bad Frankenhausen.